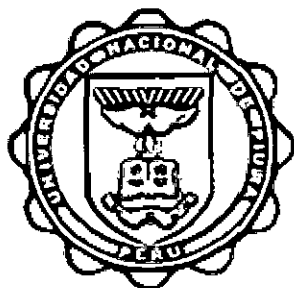




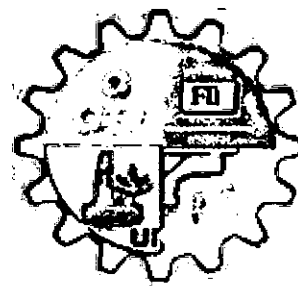
**UNIVERSIDAD NACIONAL DE PIURA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA**



**MECATRÓNICA**



**“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE  
POSICIÓN DE UNA ESFERA SÓLIDA SOBRE UNA BARRA  
BASCULANTE”**

**PRESENTADA POR:**

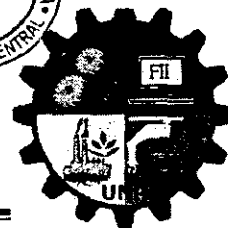
**Bach. LEONARD ALEXANDER ALCARRAZ VIVAS**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO MECATRÓNICO**

**Piura, Perú  
2015**



UNIVERSIDAD NACIONAL DE PIURA  
FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL  
DECANATO



**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS**

Los Miembros del Jurado Calificador de la Tesis denominada: «IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE POSICIÓN DE UNA ESFERA SÓLIDA SOBRE UNA BARRA BASCULANTE», presentada por el señor **LEONARD ALEXANDER ALCARRAZ VIVAS**, Bachiller de la Escuela Profesional en **Ingeniería Mecatrónica**, asesorado por el **Ing. Luis Calderón Pinedo** y co asesorado por el **Ing. Hebert Eduardo Espino Aguirre**; reunidos para la sustentación de ésta y luego de escuchar su exposición y las respuestas a las preguntas formuladas, la declaran:



Con el Calificativo:

APROBADO

BUENO

En consecuencia el sustentante se encuentra **apto** para recibir el título profesional de **INGENIERO MECATRÓNICO**, conforme a Ley.

Piura, 21 de agosto del 2015

Ing. JOSE JULIAN IPANAQUÉ, Mg.  
PRESIDENTE - JURADO CALIFICADOR

Ing. CESAR ARTURO NIÑO CARMONA.  
VOCAL - JURADO CALIFICADOR

Ing. HERMER ERNESTO ALZAMORA ROMÁN, MSc.  
SECRETARIO - JURADO CALIFICADOR

7500  
ALC



**"IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE POSICIÓN DE  
UNA ESFERA SÓLIDA SOBRE UNA BARRA BASCULANTE"**

**TESIS PRESENTADA A LA FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL COMO  
REQUISITO PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO MECATRÓNICO**

**Bach. LEONARD A. ALCARRAZ VIVAS  
EJECUTOR**

**Ing. LUIS ALBERTO CALDERON PINEDO  
ASESOR**

**Ing. HEBERT EDUARDO ESPINO AGUIRRE  
CO-ASESOR**

**APROBADA POR:  
JURADO:**

**ING. JOSÉ JULIÁN IPANAQUE  
PRESIDENTE**

**ING. HERMER E. ALZAMORA ROMÁN  
SECRETARIO**

**ING. CÉSAR A. NIÑO CARMONA  
VOCAL**

**Piura, Perú  
2015**

#### **DEDICATORIA:**

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por haberme dado la vida y permitir llegar hasta este momento tan importante de mi formación profesional.

A mis Padres, quienes me dieron la vida, educación, por ser los más importantes y por demostrarme siempre su cariño y apoyo incondicional sin importar diferencias de opiniones.

A mi esposa Ana Patricia y mi hija Ana Sofia que son el pilar de mi vida, por demostrar el amor y cariño de familia y por estar siempre en las buenas y las malas.

## **AGRADECIMIENTO**

**En primer lugar doy infinitamente gracias a Dios, por haberme dado fuerzas y valor para culminar esta etapa de mi vida.**

**Agradezco a mis padres que han dado todo el esfuerzo para que yo ahora este culminando esta etapa de mi vida y darles las gracias por ayudarme en todos los momentos difíciles de mi vida tales como la felicidad, la tristeza, pero ellos siempre han estado junto a mí y gracias a ellos soy lo que ahora soy y con el esfuerzo de ellos y mi esfuerzo ahora puedo ser un gran profesional y seré un gran orgullo para todos los que confiaron en mí.**

## INDICE

RESUMEN.....	13
ABSTRACT.....	154
INTRODUCCIÓN.....	15
CAPITULO I: MARCO TEÓRICO.....	16
1 MARCO TEÓRICO.....	17
1.1 DEFINICIONES BÁSICAS DE CONTROL.....	17
1.1.1 CONTROL.....	17
1.1.2 SISTEMA DE CONTROL.....	17
1.1.3 OPERACIONES DE CONTROL.....	17
1.1.4 CONTROL AUTOMÁTICO.....	17
1.1.5 AUTOMÁTICO.....	17
1.1.6 AUTOMATIZACIÓN.....	17
1.1.7 SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN.....	17
1.1.8 SUPERVISIÓN Y MONITOREO.....	18
1.2 ELEMENTOS DE UN SISTEMAS DE CONTROL.....	18
1.2.1 ELEMENTOS DE CONTROL EN PROCESOS INDUSTRIALES.....	18
1.2.1.1 PLANTA.....	18
1.2.1.2 PERTURBACIONES.....	18
1.2.1.3 VARIABLES DE SALIDA.....	18
1.2.2 ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO.....	19
1.2.2.1 CONTROLADOR.....	19
1.2.2.2 ACTUADOR.....	20
1.2.2.3 PROCESO.....	20
1.2.2.4 SENSOR.....	21
1.2.3 TIPOS DE VARIABLES.....	21
1.2.3.1 VARIABLE CONTROLADA.....	21
1.2.3.2 VARIABLE MANIPULADA.....	21
1.2.3.3 VARIABLE PERTURBADORA.....	21
1.2.3.4 VARIABLE MEDIDA.....	21
1.3 CONTROL AUTOMÁTICO DE PROCESOS.....	21
1.3.1 CONTROL AUTOMÁTICO.....	22
1.3.1.1 FUNCION DEL CONTROL AUTOMATICO.....	23
1.4 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL.....	24
1.4.1 EL LAZO REALIMENTADO.....	25

1.4.2	REALIMENTACIÓN.....	25
1.4.3	CARACTERÍSTICAS DE LA REALIMENTACIÓN .....	26
1.4.4	EL ACTUADOR FINAL.....	26
1.4.5	EL PROCESO .....	27
1.4.6	EL CONTROLADOR AUTOMÁTICO .....	27
1.4.7	CONTROLANDO EL PROCESO.....	27
1.4.8	SELECCIÓN DE LA ACCIÓN DEL CONTROLADOR .....	29
1.4.9	VARIACIONES.....	30
1.4.10	CARACTERISTICAS DEL PROCESO Y CONTROLABILIDAD.....	30
1.4.11	TIPOS DE RESPUESTAS DE CONTROLADOR. ....	32
1.4.11.1	EL CONTROL SI/NO.....	32
1.4.11.2	ACCIÓN PROPORCIONAL.....	34
1.4.11.3	ACCIÓN INTEGRAL (RESET).....	37
1.4.11.4	ACCIÓN DERIVATIVA .....	39
1.5	CONTROLADOR PID .....	42
P	.....	43
I	.....	43
PI	.....	44
PD	.....	44
PID	.....	45
1.6	SINTONIZACION DE CONTROLADORES.....	46
1.6.1	REGLAS DE ZIEGLER & NICHOLS .....	46
1.6.1.1	PRIMER MÉTODO .....	46
1.6.1.2	SEGUNDO MÉTODO .....	48
1.6.2	CALIBRACION Y SINTONIA DE CONTROLADORES .....	49
1.6.3	MÉTODO SINTONÍA EN MALLA ABIERTA .....	50
1.6.3.1	MÉTODO DE LA CURVA DE REACCIÓN DEL PROCESO .....	50
1.6.3.2	DEFINICIÓN DE BUEN CONTROL .....	51
1.6.3.3	MÉTODO DE SINTONÍA EN MALLA CERRADA .....	52
1.6.3.4	MÉTODO DEL PERIODO LÍMITE (ULTIMATE METHOD).....	52
1.7	CONCEPTOS BASICOS DE PROCESAMIENTO DE IMAGENES.....	54
1.7.1	IMAGEN.....	54
1.7.2	FOTOGRAMA.....	54
1.7.3	PÍXEL (PICTURE ELEMENT).....	54
1.7.4	IMAGEN BINARIA.....	54
1.7.5	LA IMAGEN DIGITAL.....	54

1.7.5.1	FUNDAMENTOS DE LAS IMÁGENES DIGITALES.....	54
1.7.6	DISPOSITIVOS DE CAPTURA DE IMÁGENES.....	55
1.7.7	IMÁGENES BLANCO/NEGRO Y COLOR.....	58
1.7.8	RESOLUCIÓN ESPACIAL Y EN AMPLITUD.....	58
1.7.9	REPRESENTACIÓN DE IMÁGENES DIGITALES.....	60
1.8	PROCESAMIENTO Y ANALISIS DE IMÁGENES DIGITALES.....	60
1.9	PROCESAMIENTO BASICO DE IMÁGENES.....	61
1.9.1	OPERACIONES INDIVIDUALES.....	62
1.9.2	OPERADOR IDENTIDAD.....	63
1.9.3	OPERADOR INVERSO O NEGATIVO.....	63
1.9.4	OPERADOR UMBRAL.....	64
1.9.5	TRANSFORMACIÓN DE VECINDAD.....	65
1.9.5.1	NOCIONES Y PROPIEDADES DE VECINDAD.....	65
1.9.5.2	CONECTIVIDAD.....	66
1.9.6	OPERACIONES DE FILTRADO.....	67
1.9.6.1	FILTROS PASO BAJO.....	67
1.9.6.2	FILTROS PASO ALTO.....	68
1.9.7	HISTOGRAMA.....	68
1.10	INTELIGENCIA ARTIFICIAL.....	69
1.11	VISION ARTIFICIAL.....	69
1.12	ESPACIOS DE COLORES Y COLORIMETRÍA.....	70
1.12.1	ESPACIO DE COLOR RGB.....	71
1.12.2	ESPACIO DE COLOR HSV.....	72
1.13	ARDUINO.....	74
1.13.1	HISTORIA.....	75
1.13.2	APLICACIONES.....	76
1.13.3	ESQUEMA DE CONEXIONES.....	77
1.13.3.1	ENTRADAS Y SALIDAS.....	77
1.13.4	LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN DE ARDUINO.....	79
CAPITULO II: MATERIAL Y MÉTODOS.....		80
2	MATERIAL Y MÉTODOS.....	81
2.1	MATERIALES.....	81
2.2	METODOLOGÍA.....	81
2.2.1	CONSTRUCCIÓN DE LA PLANTA.....	83
2.2.2	ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES.....	84



2.2.3	CONTROLADOR.....	87
2.2.4	ACTUADOR.....	87
2.2.5	MODELO MATEMÁTICO DE LA PLANTA .....	88
CAPITULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....		90
3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	91
CONCLUSIONES.....		99
RECOMENDACIONES.....		100
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....		101
ANEXO N° 1 .....		102
ANEXO N° 2 .....		104

## INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1-1 SISTEMA INTERCAMBIADOR DE CALOR.....	23
FIGURA 1-2 LAZO DE CONTROL AUTOMÁTICO.....	25
FIGURA 1-3 ACCIÓN DE CONTROL PROPORCIONAL.....	28
FIGURA 1-4 RESPUESTA NIVEL - CAUDAL.....	29
FIGURA 1-5 TIEMPO DE RESPUESTA DEL PROCESO.....	32
FIGURA 1-6 CONTROL ON-OFF .....	32
FIGURA 1-7 RESPUESTA DE CONTROLADOR A LAZO ABIERTO .....	33
FIGURA 1-8 BANDA PROPORCIONAL.....	34
FIGURA 1-9 ACCIÓN PROPORCIONAL.....	35
FIGURA 1-10 RESPUESTA DE LAZO CERRADO .....	36
FIGURA 1-11 ACCIÓN INTEGRAL.....	38
FIGURA 1-12 ACCIÓN PROPORCIONAL - INTEGRAL.....	39
FIGURA 1-13 ACCIÓN DERIVATIVA .....	40
FIGURA 1-14 ACCIÓN PROPORCIONAL MAS DEERIVATIVA.....	40
FIGURA 1-15 ACCIÓN PROPORCIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVO .....	41
FIGURA 1-16 DIAGRAMA DE BLOQUES .....	43
FIGURA 1-17 DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN SISTEMA REALIMENTADO .....	46
FIGURA 1-18 PRIMER METODO DE ZIEGLER & NICHOLS .....	46
FIGURA 1-19 RESPUESTA EN FRECUENCIA .....	47
FIGURA 1-20 SEGUNDO METODO DE ZIEGLER NICHOLS .....	48
FIGURA 1-21 RESPUESTA AL SISTEMA .....	48
FIGURA 1-22 RAZÓN DE DECAIMIENTO .....	51
FIGURA 1-23 COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE DIFERENTES PROCESOS .....	53
FIGURA 1-24 DIGITALIZACIÓN DE UNA SEÑAL ANALÓGICA.....	56

FIGURA 1-25 CAPTURA DE UNA IMAGEN 3D POR UN DISPOSITIVO CCD .....	57
FIGURA 1-26 FIGURA DEL ÁRBOL CAPTURADA POR UNA CÁMARA CON 4X4 SENSORES DE INTENSIDAD .....	57
FIGURA 1-27 CUATRO REPRESENTACIONES DE LA MISMA IMAGEN CON VARIACIÓN EN EL NÚMERO DE PÍXELES UTILIZADOS .....	59
FIGURA 1-28 SEIS REPRESENTACIONES DE LA MISMA IMAGEN CON VARIACIÓN EN EL NÚMERO DE NIVELES DE GRIS UTILIZADOS.....	59
FIGURA 1-29 CONVENCION DE EJES UTILIZADA PARA LA REPRESENTACIÓN DE IMÁGENES DIGITALES.....	60
FIGURA 1-30 FUNCIONES DE PUNTO Y VECINDAD .....	61
FIGURA 1-31 OPERACIÓN INDIVIDUAL .....	62
FIGURA 1-32 REPRESENTACIÓN DEL OPERADOR IDENTIDAD .....	63
FIGURA 1-33 REPRESENTACIÓN DEL OPERADOR INVERSO.....	64
FIGURA 1-34 REPRESENTACIÓN DEL OPERADOR UMBRAL .....	64
FIGURA 1-35 VECINDAD DE UN PIXEL.....	65
FIGURA 1-36 TRES NÚCLEOS REPRESENTATIVOS DE FILTROS PASO BAJO .....	68
FIGURA 1-37 TRES NÚCLEOS REPRESENTATIVOS DE FILTROS PASO ALTO .....	68
FIGURA 1-38 HISTOGRAMA .....	69
FIGURA 1-39 MODELO ADITIVO RGB.....	72
FIGURA 1-40 PESO DE LAS 3 COMPONENTES EN EL MODELO RGB .....	72
FIGURA 1-41 MODELO HSV .....	73
FIGURA 1-42 TINTE, SATURACIÓN Y VALOR.....	74
FIGURA 1-43 ARDUINO UNO.....	74
FIGURA 1-44 PARTES DEL ARDUINO UNO.....	77
FIGURA 1-45 PINES DEL ARDUINO UNO .....	78

FIGURA 2-1 DIAGRAMA DEL SISTEMA .....	82
FIGURA 2-2 SISTEMA BARRA ESFERA .....	84
FIGURA 2-3 IMAGEN CAPTURADA POR EL SISTEMA ANTES DE SER PROCESADA .....	85
FIGURA 2-4 ALGORITMO DE SEGMENTACIÓN DE LA ESFERA.....	86
FIGURA 2-5 SEÑALES DE CONTROL .....	87
FIGURA 2-6 SISTEMA A CONTROLAR .....	88
FIGURA 3-1 IMAGEN ORIGINAL .....	91
FIGURA 3-2 COMPONENTE ROJA DE LA IMAGEN COLOR .....	91
FIGURA 3-3 IMAGEN EN ESCALA DE GRISES.....	92
FIGURA 3-4 SUSTRACCIÓN DE LAS 2 IMAGENES.....	92
FIGURA 3-5 IMAGEN DESPUES DE APLICAR FILTRO MEDIANA.....	93
FIGURA 3-6 HISTOGRAMA DE LA IMAGEN .....	93
FIGURA 3-7 IMAGEN BINARIZADA.....	94
FIGURA 3-8 CENTROIDE DE LA IMAGEN RESULTANTE .....	94
FIGURA 3-9 RESPUESTA AL ESCALÓN, SISTEMA EN LAZO ABIERTO .....	95
FIGURA 3-10 RESPUESTA A UN ESCALON, CONTROLADOR P .....	95
FIGURA 3-11 RESPUESTA A UN ESCALON, CONTROLADOR PI.....	96
FIGURA 3-12 RESPUESTA A UN ESCALON, CONTROLADOR PID .....	96
FIGURA 3-13 RESPUESTA A UN ESCALÓN, CONTROLADOR PD .....	97
FIGURA 3-14 POSICIÓN INICIAL DEL SISTEMA .....	97
FIGURA 3-15 DIAGRAMA REPRESENTATIVO DE GRADOS DE ROTACIÓN VERSUS POSICION EN PÍXELES.....	978



## **INDICE DE TABLAS**

<b>TABLA 1-1 VALORES PROPUESTOS POR ZIEGLER &amp; NICHOLS .....</b>	<b>47</b>
<b>TABLA 1-2 VALORES PROPUESTOS POR ZIEGLER NICHOLS .....</b>	<b>49</b>
<b>TABLA 1-3 ECUACIONES EMPÍRICAS PARA AJUSTES DE CONTROLADORES PROPUESTOS POR ZIEGLER &amp; NICHOLS .....</b>	<b>50</b>
<b>TABLA 1-4 CRITERIOS DE EVALUACIÓN .....</b>	<b>51</b>
<b>TABLA 1-5 ECUACIONES EMPÍRICAS PARA AJUSTES DE CONTROLADORES .....</b>	<b>53</b>
<b>TABLA 1-6 MICROCONTROLADORES ATMEGA168, ATMEGA328 Y ATMEGA1280 .....</b>	<b>79</b>

## **RESUMEN**

La presente tesis ha sido basada en un modelo clásico de la Ingeniería de Control y se ha orientado a la implementación de un sistema de control de posición de una esfera sólida sobre una barra basculante teniendo como principal objetivo, lograr la demostración práctica de las ecuaciones que gobiernan el Sistema Barra – Esfera, haciendo uso de Hardware y Software que permitieron digitalizar los datos obtenidos para ser procesados y controlar la planta propuesta del modelo en mención.

El sistema Barra – Esfera, se encuentra en la clasificación de los sistemas inestables, para el desarrollo de éste proyecto se cuenta con un sistema mecánico que posee dos grados de libertad y un solo actuador, el trabajo consiste en balancear una esfera sobre una barra y llevarla a una posición deseada, balancear la esfera de acuerdo a técnicas y patrones de control para lograr que la esfera represente el comportamiento de un sistema dado. La primera parte de este trabajo está dedicada al diseño de todas las partes que conforman el sistema incluyendo los diagramas que describan o especifiquen medidas, ángulos, pesos y materiales; tomando como referencia algunos prototipos existentes. En la segunda parte se diseñaron los algoritmos de procesamiento de imágenes, junto a los de captura a través de una cámara web, para localizar la posición de la esfera.

Para la elección de la estrategia de control aplicada, se realizaron cálculos y pruebas que permitieron determinar que el controlador digital más apropiado era el PID y se procedió a su diagramación y programación.

La realización física de todo el sistema se ha hecho en una maqueta, la cual ha permitido hacer las pruebas y demostraciones correspondientes, además cabe indicar que dicha maqueta puede ser también utilizada como módulo didáctico para prácticas de laboratorio ya que la tarjeta de desarrollo permite realizar la programación y modificarla indefinidamente.

## **ABSTRACT**

**This thesis was based on a classical model of Control Engineering and has focused on the implementation of a control system of a solid sphere position on a rocking bar with the main objective , to achieve practical demonstration of the equations govern the Bar - Sphere System, using hardware and software that allowed digitize the data to be processed and control the proposed plant model in question.**

**The Bar - Sphere System is in the classification of unstable systems for the development of this project it has a mechanical system that has two degrees of freedom and a single actuator the job is balancing a ball on a rod and take it to a desired position, balancing the sphere according to technical and control standards for attaining the sphere represents the behavior of a given system. The first part of this work is dedicated to the design of all the parts that make up the system including diagrams describing or specifying measures, angles, weights and materials; with reference to some existing prototypes. In the second part the image processing algorithms, along with the capture through a web camera to locate the position of the sphere were designed.**

**For the election of the applied control strategy , calculations and tests allowed to determine the most appropriate digital PID controller was and proceeded to layout and programming were performed .**

**The physical realization of the entire system has become a model, which has allowed for the corresponding test and demonstrations also should be noted that this model can also be used as a teaching module for laboratory practices and the development board allows programming and modify indefinitely.**

## INTRODUCCION

En la actualidad en la industria es necesario el control de sistemas muy variantes donde se requiere una respuesta rápida del controlador para poder estabilizar correctamente el proceso.

Un problema que surge en el campo de la aeronáutica es el control de un cohete durante el despegue vertical.

El ángulo del cohete de propulsión a chorro debe ser continuamente controlado para prevenir que el cohete caiga. Sin el control de retroalimentación para estabilizar los movimientos, no habría cohetes en el espacio.

Es entonces que mediante este proyecto de investigación se quiere desarrollar un sistema de control para un proceso inestable y que necesita de una respuesta rápida por parte del controlador.

Una de las soluciones actuales es el controlador PID cuya ventaja es su fácil implementación y es una buena alternativa en aplicaciones donde no sea tan crítico el tiempo de respuesta, tiene como limitación que no es sencillo sintonizar .

El sistema barra - esfera es un sistema diseñado específicamente para el estudio teórico y práctico de la investigación de los principios básicos y avanzados de la ingeniería de control.

Este proyecto se centra específicamente en los problemas de control de sistemas inestables, siendo estos comunes en la industria. También puede, sin embargo, ser utilizado como una introducción practica al diseño, operación y aplicación de sistemas de control en general.

Este sistema de posicionamiento se ha convertido en uno de los más importantes y perdurable en la enseñanza de los sistemas de control en ingeniería, porque aunque es de fácil entendimiento, las técnicas de control que se pueden estudiar en él, contemplan importantes métodos clásicos y modernos de control.



# **CAPITULO I:**

# **MARCO TEÓRICO**

---

## 1 MARCO TEÓRICO

### 1.1 DEFINICIONES BÁSICAS DE CONTROL<sup>1</sup>

#### 1.1.1 CONTROL

Acción ejercida con el fin de poder mantener una variable dentro de un rango de valores predeterminados.

#### 1.1.2 SISTEMA DE CONTROL

Conjunto de equipos y componentes, que van a permitir llevar a cabo las operaciones de control.

#### 1.1.3 OPERACIONES DE CONTROL

Conjunto de acciones que buscan mantener una variable dentro de patrones de funcionamiento deseados.

#### 1.1.4 CONTROL AUTOMÁTICO

Es el desarrollo de la acción de control, sin la participación directa de un ser humano (operario).

#### 1.1.5 AUTOMÁTICO

Es todo aquello que se mueve, regula, y opera, por sí solo, independiente del medio que lo rodea.

#### 1.1.6 AUTOMATIZACIÓN

Consiste de un sistema de control automático, por el cual el sistema verifica su propio funcionamiento, efectuando mediciones y correcciones sin la interferencia del ser humano.

#### 1.1.7 SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN

Conjunto de equipos, sistemas de información, y procedimientos que van a permitir asegurar un desempeño independiente del proceso, a través de operaciones de control y supervisión.

---

<sup>1</sup>KATSUHIKO OGATA (1987) "Discrete-Time Control Systems". USA. Prentice Hall.

### **1.1.8 SUPERVISIÓN Y MONITOREO**

Es el proceso de lectura de valores de las diversas variables del proceso, con el objetivo de identificar el estado en el que se viene desarrollando el proceso en un tiempo actual.

## **1.2 ELEMENTOS DE UN SISTEMAS DE CONTROL**

### **1.2.1 ELEMENTOS DE CONTROL EN PROCESOS INDUSTRIALES**

Dependiendo del tipo de proceso industrial y la función de control requerida, los sistemas de control van desde los más simples como mantener el nivel de agua o de temperatura en un tanque, hasta los más complicados en los cuales se hace uso de equipos sofisticados y conjuntos de algoritmos de control óptimo, control robusto, inteligencia artificial, etc.

Se realiza el control de un proceso, cuando es posible regular el valor de la variable de salida, variando el valor de la señal de control.

#### **1.2.1.1 PLANTA**

Es el ambiente donde se encuentran los equipos y donde se lleva a cabo el proceso. Se puede decir que es el conjunto de objetos físicos, en los cuales es necesario desarrollar acciones especialmente organizadas con el fin de lograr los resultados de funcionamiento y performance deseados; estos objetos van a ser controlados por medio de acciones.

Señales de control: Son aquellas acciones elaboradas por el sistema de control, o dadas por un operario, a través de las variables manipuladas (por ejemplo si se desea mantener un tanque a una temperatura constante, se deberá manipular el nivel de voltaje que recibe la resistencia que brinda calor al tanque).

#### **1.2.1.2 PERTURBACIONES**

Son aquellas acciones que no dependen del sistema de control ni del operario, pero intervienen positiva o negativamente en el proceso (por ejemplo para el caso anterior si se desea mantener una temperatura constante en un tanque, la temperatura ambiental actuará e interferirá con el calor del tanque).

#### **1.2.1.3 VARIABLES DE SALIDA**

Son aquellas que caracterizan el estado de los procesos dentro de la planta, estas variables son guiadas por variables controladas. Por ejemplo, si se cuenta con un recipiente

de agua en el cual la variable de salida será el nivel, entonces la variable controlada será el flujo de líquido que ingresa al recipiente.

**Proceso industrial:** Es la sucesión de cambios graduales (en el tiempo) de materia y energía, todo proceso implica una transformación; generalizando se puede decir que es todo fenómeno físico que se puede medir y controlar. Pueden ser procesos continuos (siderúrgica, petroquímica), procesos de manufactura (embotelladoras, confección de textiles), procesos de servicio (distribución de agua), y procesos híbridos (reciclaje de vidrio).

## **1.2.2 ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO**

Adicionalmente a los componentes anteriores, se encuentran aquellos que le van a dar la particularidad de ser automático, es decir, el sistema de control va a actuar independiente del operario y va a determinar por sí mismo los mejores valores para las señales de control.

Para ello se contará con una referencia, que es un valor dado por el operario, este valor es fijo y depende del tipo de proceso y de las exigencias que este amerite; es conocido como set -point, este valor es el que se desea alcanzar y mantener.

Así tenemos 4 elementos que conforman el sistema de control:

### **1.2.2.1 CONTROLADOR**

Es aquel instrumento que compara el valor medido con el valor deseado, en base a esta comparación calcula un error (diferencia entre valor medido y deseado), para luego actuar a fin de corregir este error. Tiene por objetivo elaborar la señal de control que permita que la variable controlada corresponda a la señal de referencia.

Los controladores pueden ser de tipo manual, neumático, electrónico; los controladores electrónicos más usados son: computadoras con tarjetas de adquisición de datos, PLC (controladores lógicos programables), microcontroladores (PIC).

El tipo de controlador más común es el PLC, el cual es un equipo electrónico basado en microprocesadores, hace uso de memorias programables y regrabables (RAM), en donde se almacenan instrucciones a manera de algoritmos que van a permitir seguir una lógica de control. Contiene interfaces que le permiten manejar gran número de entradas y salidas tanto analógicas como digitales.

### 1.2.2.2 ACTUADOR

Es aquel equipo que sirve para regular la variable de control y ejecutar la acción de control, es conocido como elemento final de control, estos pueden ser de 3 tipos:

**Actuadores eléctricos:** Son usados para posicionar dispositivos de movimientos lineales o rotacionales. Ej. Motor, relé, switch, electroválvulas.

**Actuadores neumáticos:** Trabajan con señales de presión, estas señales son convertidas a movimientos mecánicos. Ej. Pistones neumáticos, válvulas.

**Actuadores hidráulicos:** Operan igual a los neumáticos, son usados en tareas que requieren mayor fuerza por ejemplo levantar compuertas, mover grúas, elevadores, etc. Ej. Pistones hidráulicos.

### 1.2.2.3 PROCESO

Esta referido al equipo que va a ser automatizado, por ejemplo puede ser una bomba, tolva, tanque, compresor, molino, intercambiador de calor, horno, secador, chancadora, caldera, etc.

**Características dinámicas de las variables de proceso:**

**Inercia:** Propiedad de los cuerpos que les permite no variar su estado estacionario sin la intervención de una fuerza extraña; por ejemplo algunos sistemas de flujo de fluidos en los cuales la masa puede ser acelerada.

**Resistencia y Capacidad:** Se denomina resistencia a aquellas partes con cualidades de resistir la transferencia de energía o masa, y se denomina capacidad a aquellas partes del proceso con tendencia a almacenar masa o energía.

**Atraso de transporte:** Es el movimiento de masas entre dos puntos que ocasiona un tiempo muerto.

**Respuesta de los procesos frente a una perturbación:**

Las respuestas están casi siempre caracterizadas por dos constantes:

Una constante de tiempo y una ganancia estática. La ganancia es la amplificación o atenuación de la perturbación en el interior del proceso y no tiene interferencia con las características de tiempo de respuesta.

La constante de tiempo es la medida necesaria para ajustar una perturbación en la entrada y puede ser expresada como  $\tau = (\text{resistencia}) \times (\text{capacidad})$ .

#### **1.2.2.4 SENSOR**

Es un elemento de medición de parámetros o variables del proceso. Los sensores pueden ser usados también como indicadores, para transformar la señal medida en señal eléctrica. Los sensores más comunes son los de nivel, temperatura, presencia, proximidad, flujo, presión, entre otros.

### **1.2.3 TIPOS DE VARIABLES**

Se define como variables a todo aquel parámetro físico cuyo valor puede ser medido. Puede ser:

#### **1.2.3.1 VARIABLE CONTROLADA**

Es aquella que se busca mantener constante o con cambios mínimos. Su valor debe seguir al set-point.

#### **1.2.3.2 VARIABLE MANIPULADA**

A través de esta se debe corregir el efecto de las perturbaciones. Sobre esta se colocará el actuador

#### **1.2.3.3 VARIABLE PERTURBADORA**

Esta dado por los cambios repentinos que sufre el sistema y que provocan inestabilidad.

#### **1.2.3.4 VARIABLE MEDIDA**

Es toda variable adicional, cuyo valor es necesario registrar y monitorear, pero que no es necesario controlar.

### **1.3 CONTROL AUTOMÁTICO DE PROCESOS**

El control automático de procesos es parte del progreso industrial desarrollado durante la segunda revolución industrial. El uso intensivo de la ciencia de control automático es producto de una evolución que es consecuencia del uso difundido de las técnicas de medición y control. Su estudio intensivo ha contribuido al reconocimiento universal de sus ventajas.

El control automático de procesos se usa fundamentalmente porque reduce el costo de los procesos industriales, lo que compensa con creces la inversión en equipo de control. Además hay muchas ganancias intangibles, como por ejemplo la eliminación de mano de obra pasiva, la cual provoca una demanda equivalente de trabajo especializado. La eliminación de errores es otra contribución positiva del uso del control automático.

El principio del control automático o sea el empleo de una realimentación o medición para accionar un mecanismo de control, es muy simple. El mismo principio del control automático se usa en diversos campos, como control de procesos químicos y del petróleo, control de hornos en la fabricación del acero, control de máquinas herramientas, y en el control y trayectoria de un proyectil.

El uso de las computadoras analógicas y digitales ha posibilitado la aplicación de ideas de control automático a sistemas físicos que hace apenas pocos años eran imposibles de analizar o controlar.

Es necesaria la comprensión del principio del control automático en la ingeniería moderna, por ser su uso tan común como el uso de los principios de electricidad o termodinámica, siendo por lo tanto, una parte de primordial importancia dentro de la esfera del conocimiento de ingeniería. También son tema de estudio los aparatos para control automático, los cuales emplean el principio de realimentación para mejorar su funcionamiento.

### **1.3.1 CONTROL AUTOMÁTICO**

El control automático es el mantenimiento de un valor deseado dentro de una cantidad o condición, midiendo el valor existente, comparándolo con el valor deseado, y utilizando la diferencia para proceder a reducirla. En consecuencia, el control automático exige un lazo cerrado de acción y reacción que funcione sin intervención humana.

El elemento más importante de cualquier sistema de control automático es lazo de control realimentado básico. El concepto de la realimentación no es nuevo, el primer lazo de realimentación fue usado en 1774 por James Watt para el control de la velocidad de cualquier máquina de vapor. A pesar de conocerse el concepto del funcionamiento, los lazos se desarrollaron lentamente hasta que los primeros sistemas de transmisión neumática comenzaron a volverse comunes en los años 1940s, los años pasados han visto un extenso estudio y desarrollo en la teoría y aplicación de los lazos realimentados de control. En la actualidad los lazos de control son un elemento esencial para la manufactura económica y prosperidad de virtualmente cualquier producto, desde el acero hasta los

productos alimenticios. A pesar de todo, este lazo de control que es tan importante para la industria está basado en algunos principios fácilmente entendibles y fáciles. Los conceptos que se tratan en los siguientes párrafos, son, lazo de control, sus elementos básicos, y los principios básicos de su aplicación.

### 1.3.1.1 FUNCION DEL CONTROL AUTOMATICO

La idea básica de lazo realimentado de control es más fácilmente entendida imaginando qué es lo que un operador tendría que hacer si el control automático no existiera.

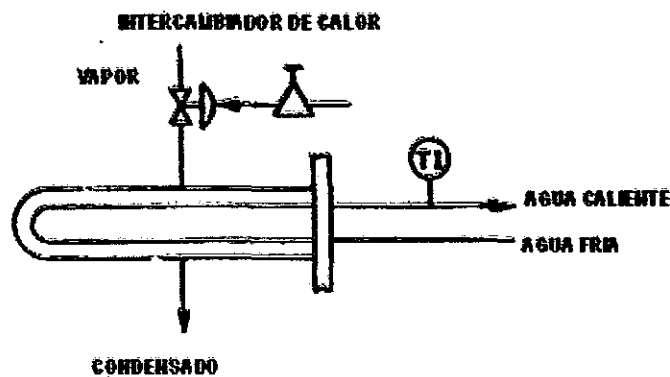


Figura 1-1 SISTEMA INTERCAMBIADOR DE CALOR

La figura muestra una aplicación común del control automático encontrada en muchas plantas industriales, un intercambiador de calor que usa calor para calentar agua fría. En operación manual, la cantidad de vapor que ingresa al intercambiador de calor depende de la presión de aire hacia la válvula que regula el paso de vapor. Para controlar la temperatura manualmente, el operador observaría la temperatura indicada, y al compararla con el valor de temperatura deseado, abriría o cerraría la válvula para admitir más o menos vapor. Cuando la temperatura ha alcanzado el valor deseado, el operador simplemente mantendría esa regulación en la válvula para mantener la temperatura constante. Bajo el control automático, el controlador de temperatura lleva a cabo la misma función. La señal de medición hacia el controlador desde el transmisor de temperatura (o sea el sensor que mide la temperatura) es continuamente comparada con el valor de consigna (set-point en Inglés) ingresado al controlador. Basándose en una comparación de señales, el controlador automático puede decir si la señal de medición está por arriba o por debajo del valor de



consigna y mueve la válvula de acuerdo a ésta diferencia hasta que la medición (temperatura) alcance su valor final.

#### **1.4 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL**

Los sistemas de control se clasifican en sistemas de lazo abierto y a lazo cerrado. La distinción la determina la acción de control, que es la que activa al sistema para producir la salida.

Un sistema de control de lazo abierto es aquel en el cual la acción de control es independiente de la salida.

Un sistema de control de lazo cerrado es aquel en el que la acción de control es en cierto modo dependiente de la salida. Los sistemas de control a lazo abierto tienen dos rasgos sobresalientes:

- a) La habilidad que éstos tienen para ejecutar una acción con exactitud está determinada por su calibración. Calibrar significa establecer o restablecer una relación entre la entrada y la salida con el fin de obtener del sistema la exactitud deseada.
- b) Estos sistemas no tienen el problema de la inestabilidad, que presentan los de lazo cerrado. Los sistemas de control de lazo cerrado se llaman comúnmente sistemas de control por realimentación (o retroacción).

Ejemplo 1:

Un tostador automático es un sistema de control de lazo abierto, que está controlado por un regulador de tiempo. El tiempo requerido para hacer tostadas, debe ser anticipado por el usuario, quien no forma parte del sistema. El control sobre la calidad de la tostada (salida) es interrumpido una vez que se ha determinado el tiempo, el que constituye tanto la entrada como la acción de control.

Ejemplo 2:

Un mecanismo de piloto automático y el avión que controla, forman un sistema de control de lazo cerrado (por realimentación). Su objetivo es mantener una dirección específica del avión, a pesar de los cambios atmosféricos. El sistema ejecutará su tarea midiendo

continuamente la dirección instantánea del avión y ajustando automáticamente las superficies de dirección del mismo (timón, aletas, etc.) de modo que la dirección instantánea coincida con la especificada. El piloto u operador, quien fija con anterioridad el piloto automático, no forma parte del sistema de control.

### 1.4.1 EL LAZO REALIMENTADO

El lazo de control realimentado simple sirve para ilustrar los cuatro elementos principales de cualquier lazo de control.

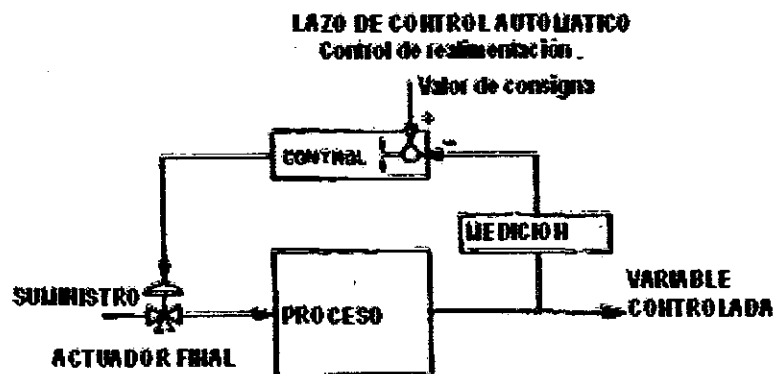


Figura 1-2 LAZO DE CONTROL AUTOMÁTICO

La medición debe ser hecha para indicar el valor actual de la variable controlada por el lazo. Mediciones corrientes usadas en la industria incluyen caudal, presión, temperatura, mediciones analíticas tales como pH, conductividad y muchas otras particulares específicas de cada industria.

### 1.4.2 REALIMENTACIÓN

Es la propiedad de una sistema de lazo cerrado que permite que la salida (o cualquier otra variable controlada del sistema) sea comparada con la entrada al sistema (o con una entrada a cualquier componente interno del mismo con un subsistema) de manera tal que se pueda establecer una acción de control apropiada como función de la diferencia entre la entrada y la salida.

Más generalmente se dice que existe realimentación en un sistema cuando existe una secuencia cerrada de relaciones de causa y efecto entre las variables del sistema.

El concepto de realimentación está claramente ilustrado en el mecanismo del piloto automático del ejemplo dado.

La entrada es la dirección especificada, que se fija en el tablero de control del avión y la salida es la dirección instantánea determinada por los instrumentos de navegación automática. Un dispositivo de comparación explora continuamente la entrada y la salida.

Cuando los dos coinciden, no se requiere acción de control. Cuando existe una diferencia entre ambas, el dispositivo de comparación suministra una señal de acción de control al controlador, o sea al mecanismo de piloto automático. El controlador suministra las señales apropiadas a las superficies de control del avión, con el fin de reducir la diferencia entre la entrada y la salida. La realimentación se puede efectuar por medio de una conexión eléctrica o mecánica que vaya desde los instrumentos de navegación que miden la dirección hasta el dispositivo de comparación.

### **1.4.3 CARACTERÍSTICAS DE LA REALIMENTACIÓN**

Los rasgos más importantes que la presencia de realimentación imparte a un sistema son:

- Aumento de la exactitud. Por ejemplo, la habilidad para reproducir la entrada fielmente.
- Reducción de la sensibilidad de la salida, correspondiente a una determinada entrada, ante variaciones en las características del sistema.
- Efectos reducidos de la no linealidad y de la distorsión.
- Aumento del intervalo de frecuencias (de la entrada) en el cual el sistema responde satisfactoriamente (aumento del ancho de Banda)
- Tendencia a la oscilación o a la inestabilidad.

### **1.4.4 EL ACTUADOR FINAL**

Por cada proceso debe haber un actuador final, que regule el suministro de energía o material al proceso y cambie la señal de medición. Más a menudo éste es algún tipo de válvula, pero puede ser además una correa o regulador de velocidad de motor, posicionador, etc.

### **1.4.5 EL PROCESO**

Los tipos de procesos encontrados en las plantas industriales son tan variados como los materiales que producen. Estos se extienden desde lo simple y común, tales como los lazos que controlan caudal, hasta los grandes y complejos como los que controlan columnas de destilación en la industria petroquímica.

### **1.4.6 EL CONTROLADOR AUTOMÁTICO**

El último elemento del lazo es el controlador automático, su trabajo es controlar la Medición. "Controlar" significa mantener la medición dentro de límites aceptables. En éste artículo, los mecanismos dentro del controlador automático no serán considerados. Por lo tanto, los principios a ser tratados pueden ser aplicados igualmente tanto para los controladores neumáticos como para los electrónicos y a controladores de todos los fabricantes. Todos los controladores automáticos usan las mismas respuestas generales, a pesar de que los mecanismos internos y las definiciones dadas para esta respuesta pueden ser ligeramente diferentes de un fabricante al otro.

Un concepto básico es que para que el control realimentado automático exista, es que el lazo de realimentación esté cerrado. Esto significa que la información debe ser continuamente transmitida dentro del lazo. El controlador debe poder mover a la válvula, la válvula debe poder afectar a la medición, y la señal de medición debe ser reportada al controlador. Si la conexión se rompe en cualquier punto, se dice que el lazo está abierto. Tan pronto como el lazo se abre, como ejemplo, cuando el controlador automático es colocado en modo manual, la unidad automática del controlador queda imposibilitada de mover la válvula. Así las señales desde el controlador en respuesta a las condiciones cambiantes de la medición no afectan a la válvula y el control automático no existe.

### **1.4.7 CONTROLANDO EL PROCESO**

Al llevar a cabo la función de control, el controlador automático usa la diferencia entre el valor de consigna y las señales de medición para obtener la señal de salida hacia la válvula. La precisión y capacidad de respuesta de estas señales es la limitación básica en la habilidad del controlador para controlar correctamente la medición. Si el transmisor no envía una señal precisa, o si existe un retraso en la medición de la señal, la habilidad del controlador para manipular el proceso será degradada. Al mismo tiempo, el controlador debe recibir una señal de valor de consigna precisa (set-point).

En controladores que usan señales de valor de consigna neumática o electrónica generadas dentro del controlador, una falla de calibración del transmisor de valor de consigna resultará necesariamente en que la unidad de control automático llevará a la medición a un valor erróneo. La habilidad del controlador para posicionar correctamente la válvula es también otra limitación. Si existe fricción en la válvula, el controlador puede no estar en condiciones de mover la misma a una posición de vástago específica para producir un caudal determinado y esto aparecerá como una diferencia entre la medición y el valor de consigna.

Intentos repetidos para posicionar la válvula exactamente pueden llevar a una oscilación en la válvula y en la medición, o, si el controlador puede sólo mover la válvula muy lentamente, la habilidad del controlador para controlar el proceso será degradada. Una manera de mejorar la respuesta de las válvulas de control es el uso de posicionadores de válvulas, que actúan como un controlador de realimentación para posicionar la válvula en la posición exacta correspondiente a la señal de salida del controlador. Los posicionadores, sin embargo, deberían ser evitados a favor de los elevadores de volumen en lazos de respuesta rápida como es el caso de caudal de líquidos a presión.

Para controlar el proceso, el cambio de salida del controlador debe estar en una dirección que se oponga a cualquier cambio en el valor de medición

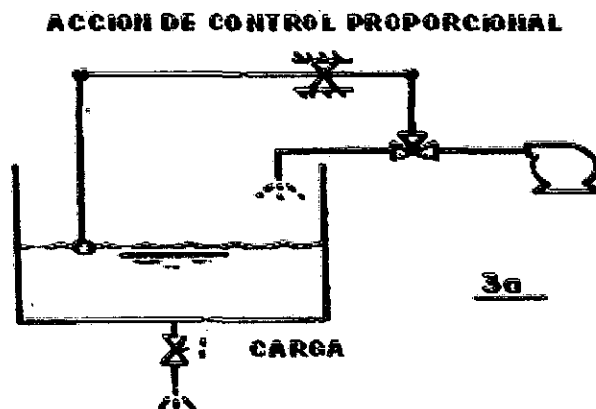


Figura 1-3 ACCIÓN DE CONTROL PROPORCIONAL

La figura muestra una válvula directa conectada a un control de nivel en un tanque a media escala. A medida que el nivel del tanque se eleva, el flotador es accionado para reducir el caudal entrante, así, cuanto más alto sea el nivel del líquido mayor será el cierre del ingreso de caudal. De la misma manera, medida que el nivel cae, el flotante abrirá la

válvula para agregar más líquido al tanque. La respuesta de éste sistema es mostrada gráficamente.

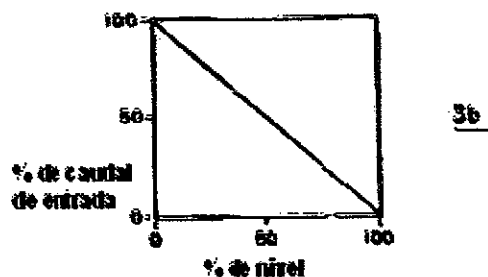


Figura 1-4 RESPUESTA NIVEL - CAUDAL

A medida que el nivel va desde el 0% al 100%, la válvula se desplaza desde la apertura total hasta totalmente cerrada. La función del controlador automático es producir este tipo de respuesta opuesta sobre rangos variables, como agregado, otras respuestas están disponibles para una mayor eficiencia del control del proceso.

#### 1.4.8 SELECCIÓN DE LA ACCIÓN DEL CONTROLADOR

Dependiendo de la acción de la válvula, un incremento en la medida puede requerir incrementos o disminuciones del valor de salida para el control. Todos los controladores pueden ser conmutados entre acción directa o reversa.

La acción directa significa que cuando el controlador ve un incremento de señal desde el transmisor, su salida se incrementa.

La acción reversa significa que un incremento en las señales de medición hace que la señal de salida disminuya.

Para determinar cuál de estas salidas es la correcta, un análisis debe ser llevado a cabo en el lazo. El primer paso es determinar la acción de la válvula. En la figura, por razones de seguridad la válvula debe cerrar si existe un fallo en el suministro de aire de la planta. Por lo tanto, esta válvula debe ser normalmente abierta con aire, o normalmente cerrada sin aire. Segundo, considere el efecto de un cambio en la medición. Para incrementar la temperatura el caudal de vapor hacia el intercambiador de calor debería ser reducido, por lo tanto, la válvula deberá cerrarse. Para cerrarse ésta válvula, la señal del controlador automático hacia la válvula debe disminuir, por lo tanto el controlador requiere acción de disminución/incremento reversa. Si se eligiera la acción directa el incremento de

señales desde el transmisor daría como resultado en un aumento del caudal de vapor, haciendo que la temperatura se incremente aún más. El resultado sería un descontrol en la temperatura. Lo mismo ocurriría en cualquier disminución de temperatura causando una caída de la misma. Una selección incorrecta de la acción del controlador siempre resulta en un lazo de control inestable tan pronto como el mismo es puesto en modo automático. Asumiendo que la acción correcta sea seleccionada en el controlador, ¿cómo sabe el dispositivo cuando la salida correcta ha sido alcanzada? , en la figura, por ejemplo, para mantener el nivel constante, el controlador debe manipular el ingreso de caudal igual al de salida, según se demande. El controlador lleva a cabo su trabajo manteniendo éste balance en un estado permanente, y actuando para restaurar este balance entre el suministro y la demanda cuando el mismo es modificado por alguna variación.

#### **1.4.9 VARIACIONES**

Cualquiera de los siguientes tres eventos podría ocurrir requiriendo un caudal diferente para mantener el nivel en el tanque. Primero, si la posición de la válvula manual de salida fuera abierta ligeramente, entonces un caudal mayor saldría del tanque, haciendo que el nivel caiga. Este es un cambio bajo demanda, y para restaurar el balance, la válvula de entrada de caudal debe ser abierta para proveer un mayor ingreso de líquido. Un segundo tipo de condición de desbalance sería un cambio en el valor de consigna. El tercer tipo de variación sería un cambio en el suministro, si la presión de salida de la bomba se incrementara, aún si la válvula de entrada se mantuviera en su posición, el incremento de presión causaría un mayor caudal, haciendo que el nivel comience a elevarse. Al medir el incremento, el controlador de nivel debería cerrar la válvula en la entrada para mantener el nivel a un valor constante. De igual manera, cualquier controlador usado en el intercambiador de calor mostrado en la figura debería balancear el suministro de calor agregado por el vapor con el calor arrastrado por el agua. La temperatura sólo se puede mantener constante si el caudal de calor entrante iguala al calor que sale.

#### **1.4.10 CARACTERISTICAS DEL PROCESO Y CONTROLABILIDAD**

El controlador automático usa cambios en la posición del actuador final para controlar la señal de medición, moviendo el actuador para oponerse a cualquier cambio que observe en la señal de medición. La controlabilidad de cualquier proceso es función de lo bien que una señal de medición responde a éstos cambios en la salida del controlador; para un buen control la medición debería comenzar a responder en forma rápida, pero luego no

*cambiar rápidamente. Debido al tremendo número de aplicaciones del control automático, caracterizando un proceso por lo que hace, o por industria, es una tarea engorrosa. Sin embargo, todos los procesos pueden ser descriptos por una relación entre las entradas y las salidas. La figura ilustra la respuesta de la temperatura del intercambiador de calor cuando la válvula es abierta incrementando manualmente la señal de salida del controlador.*

Al comienzo, no hay una respuesta inmediata en la indicación de temperatura, luego la respuesta comienza a cambiar, se eleva rápidamente al inicio, y se aproxima a la final a un nivel constante. El proceso puede ser caracterizado por dos elementos de su respuesta, el primero es el tiempo muerto (dead time en Inglés), o sea el tiempo antes de que la medición comience a responder, en éste ejemplo, el tiempo muerto se eleva debido a que el calor en el vapor debe ser conducido hasta el agua antes de que pueda afectar a la temperatura, y luego hacia el transmisor antes de que el cambio pueda ser percibido. El tiempo muerto es una función de las dimensiones físicas de un proceso y cosas tales como las velocidades de correas y regímenes de mezcla. Segundo, la capacidad de un proceso es el material o energía que debe ingresar o abandonar el proceso para cambiar las mediciones, es, por ejemplo, los litros necesarios para cambiar el nivel, las calorías necesarias para cambiar la temperatura, o los metros cúbicos de gas necesarios para cambiar la presión. La medición de una capacidad es su respuesta para un paso de entrada.

Específicamente, el tamaño de una capacidad es medida por una constante de tiempo, que es definido como el tiempo necesario para completar el 63% de su respuesta total. La constante de tiempo es una función del tamaño del proceso y del régimen de transferencia de material o energía. Para este ejemplo, cuanto más grande sea el tanque, y menor el caudal de vapor, mayor será la constante de tiempo. Estos números pueden ser de tan sólo algunos segundos, y tan largos como varias horas. Combinados con el tiempo muerto, los mismos definen cuánto tiempo lleva para que la señal responda a cambios en la posición de la válvula. Un proceso puede comenzar a responder rápidamente, pero no cambiar muy rápido si su tiempo muerto es pequeño y su capacidad muy grande. En resumen, cuanto mayor sea la constante de tiempo de la capacidad comparada con el tiempo muerto, mejor será la controlabilidad del proceso.



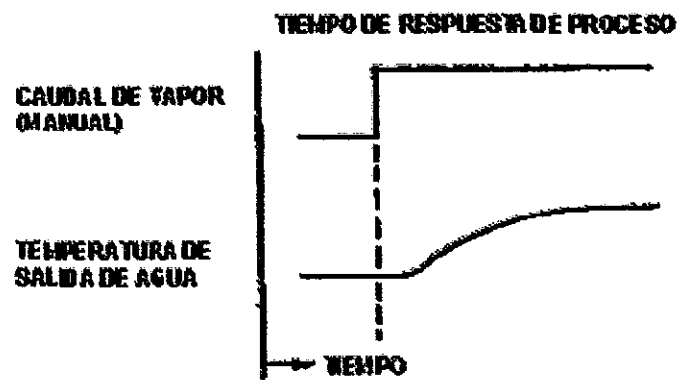


Figura 1-5 TIEMPO DE RESPUESTA DEL PROCESO

#### 1.4.11 TIPOS DE RESPUESTAS DE CONTROLADOR.

La primera y más básica característica de la respuesta del controlador ha sido indicada como la acción directa o reversa. Una vez que esta distinción se ha llevado a cabo, existen varios tipos de respuestas que pueden ser usadas para controlar un proceso. Estas son:

- Control Si/No (ó On/Off con sus siglas en Inglés), o control de dos posiciones.
- Control proporcional.
- Acción integral (reset)
- Acción derivativa .

##### 1.4.11.1 EL CONTROL SI/NO

El control SI/No es mostrado en la figura siguiente.

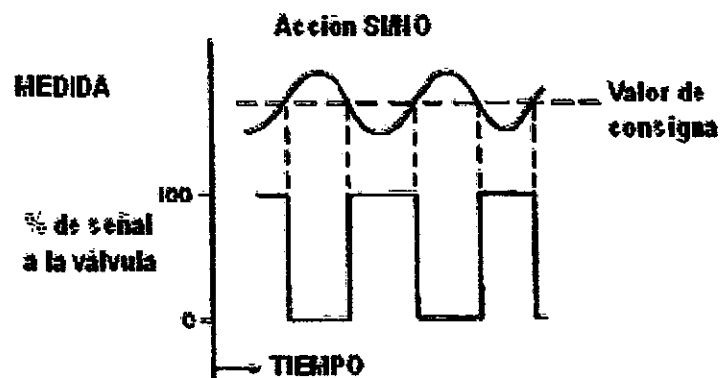


Figura 1-6 CONTROL ON - OFF

Para un controlador de acción reversa y una válvula del tipo presión-para-cerrar. El controlador Si/No tiene dos salidas que son para máxima apertura y para apertura mínima, o sea cierre. Para este sistema se ha determinado que cuando la medición cae debajo del valor de consigna, la válvula debe estar cerrada para hacer que se abra; así, en el caso en que la señal hacia el controlador automático esté debajo del valor de consigna, la salida del controlador será del 100%. A medida que la medición cruza el valor de consigna la salida del controlador va hacia el 0%. Esto eventualmente hace que la medición disminuya y a medida que la medición cruza el valor de consigna nuevamente, la salida vaya a un máximo. Este ciclo continuará indefinidamente, debido a que el controlador no puede balancear el suministro contra la carga. La continua oscilación puede, o puede no ser aceptable, dependiendo de la amplitud y longitud del ciclo. Un ciclo rápido causa frecuentes alteraciones en el sistema de suministro de la planta y un excesivo desgaste de la válvula. El tiempo de cada ciclo depende del tiempo muerto en el proceso debido a que el tiempo muerto determina cuanto tiempo toma a la señal de medición para revertir su dirección una vez que la misma cruza el valor de consigna y la salida del controlador cambia. La amplitud de la señal depende de la rapidez con que la señal de medición cambia durante cada ciclo. En procesos de gran capacidad, tales como cubas de calentamiento, la gran capacidad produce una gran constante de tiempo, por lo tanto, la medición puede cambiar sólo muy lentamente. El resultado es que el ciclo ocurre dentro de una banda muy estrecha alrededor del valor de consigna, y este control puede ser muy aceptable, si el ciclo no es muy rápido. Por lejos el tipo más común de control usado en la industria es el Si/No. Sin embargo si la medición del proceso es más sensible a los cambios en el suministro, la amplitud y frecuencia del ciclo comienza a incrementarse, en algún punto el ciclo se volverá inaceptable y alguna forma de control proporcional deberá ser aplicada.

De manera de estudiar los otros tres tipos de modos de control automático se usaran respuesta de lazo abierto. Un lazo abierto significa que sólo la respuesta del controlador será considerada.

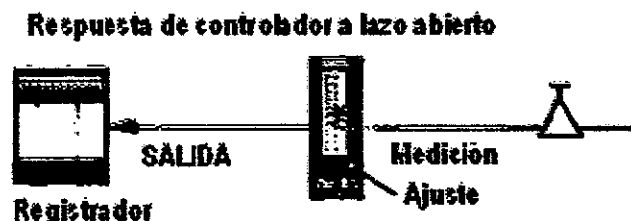


Figura 1-7 RESPUESTA DE CONTROLADOR A LAZO ABIERTO

La figura anterior muestra un controlador automático con una señal artificial desde un regulador manual introducida como la medición. El valor de consigna es introducido normalmente y la salida es registrada. Con éste arreglo, las respuestas específicas del controlador a cualquier cambio deseado en la medición puede ser observada.

#### 1.4.11.2 ACCIÓN PROPORCIONAL

La respuesta proporcional es la base de los tres modos de control, si los otros dos, acción integral (reset) y acción derivativa están presentes, éstos son sumados a la respuesta proporcional. "Proporcional" significa que el cambio presente en la salida del controlador es algún múltiplo del porcentaje de cambio en la medición.

Este múltiplo es llamado "ganancia" del controlador. Para algunos controladores, la acción proporcional es ajustada por medio de tal ajuste de ganancia, mientras que para otros se usa una "banda proporcional". Ambos tienen los mismos propósitos y efectos.

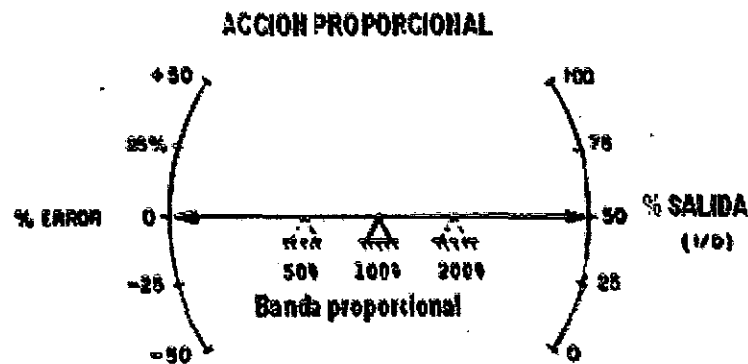


Figura 1-8 BANDA PROPORCIONAL

La figura anterior ilustra la respuesta de un controlador proporcional por medio de un indicador de entrada/salida pivotando en una de estas posiciones. Con el pivote en el centro entre la entrada y la salida dentro del gráfico, un cambio del 100% en la medición es requerido para obtener un 100% de cambio en la salida, o un desplazamiento completo de la válvula. Un controlador ajustado para responder de ésta manera se dice que tiene una banda proporcional del 100%. Cuando el pivote es hacia la mano derecha, la medición de la entrada debería tener un cambio del 200% para poder obtener un cambio de salida completo desde el 0% al 100%, esto es una banda proporcional del 200%. Finalmente, si el pivote estuviera en la posición de la mano izquierda y si la medición se moviera sólo cerca

del 50% de la escala, la salida cambiaría 100% en la escala. Esto es un valor de banda proporcional del 50%. Por lo tanto, cuantamás chica sea la banda proporcional, menor será la cantidad que la medición debe cambiar para el mismo tamaño de cambio en la medición. O, en otras palabras, menor banda proporcional implica mayor cambio de salida para el mismo tamaño de medición. Esta misma relación está representada por la figura siguiente.

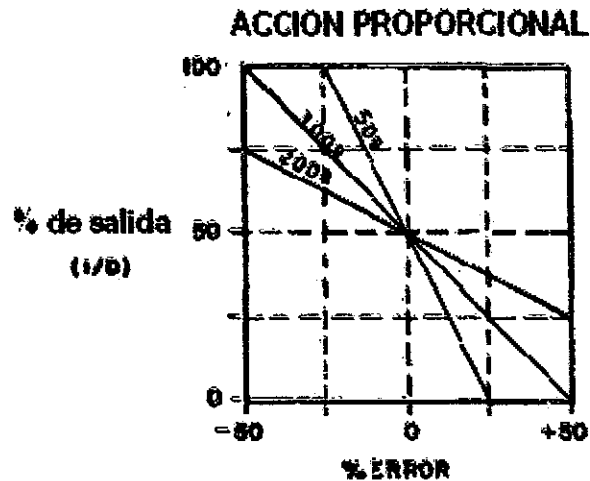


Figura 1-9 ACCIÓN PROPORCIONAL

Este gráfico muestra cómo la salida del controlador responderá a medida que la medición se desvía del valor de consigna. Cada línea sobre el gráfico representa un ajuste particular de la banda proporcional. Dos propiedades básicas del control proporcional pueden ser observadas a partir de éste gráfico:

Por cada valor de la banda proporcional toda vez que la medición se iguala al valor de consigna, la salida es del 50%.

Cada valor de la banda proporcional define una relación única entre la medición y la salida. Por cada valor de medición existe un valor específico de salida. Por ejemplo, usando una línea de banda proporcional del 100%, cuando la medición está 25% por encima del valor de consigna, la salida del controlador deberá ser del 25%. La salida del controlador puede ser del 25% sólo si la medición esta 25% por encima del valor de consigna. De la misma manera, cuando la salida del controlador es del 25%, la medición será del 25% por encima del valor de consigna. En otras palabras, existe un valor específico de salida por cada valor de medición.

Industrial controllersmarket - Mercado de controladores de procesos industriales.

- Allen Bradley Programmable Logic Controllers
- Siemens Programmable Logic Controllers
- Mitsubishi Programmable Logic Controllers
- Omron Programmable Logic Controllers
- GE Programmable Logic Controllers
- Klockner Moeller Programmable Logic Controllers
- Process controllers for the industry.

Para cualquier lazo de control de proceso sólo un valor de la banda proporcional es el mejor. A medida que la banda proporcional es reducida, la respuesta del controlador a cualquier cambio en la medición se hace mayor y mayor. En algún punto dependiendo de la característica de cada proceso particular, la respuesta en el controlador será lo suficientemente grande como para controlar que la variable medida retorne nuevamente en dirección opuesta a tal punto de causar un ciclo constante de la medición. Este valor de banda proporcional, conocido como la última banda proporcional, es un límite en el ajuste del controlador para dicho lazo. Por otro lado, si se usa una banda proporcional muy ancha, la respuesta del controlador a cualquier cambio en la medición será muy pequeña y la medición no será controlada en la forma suficientemente ajustada. La determinación del valor correcto de banda proporcional para cualquier aplicación es parte del procedimiento de ajuste (tuning procedure) para dicho lazo. El ajuste correcto de la banda proporcional puede ser observado en la respuesta de la medición a una alteración.

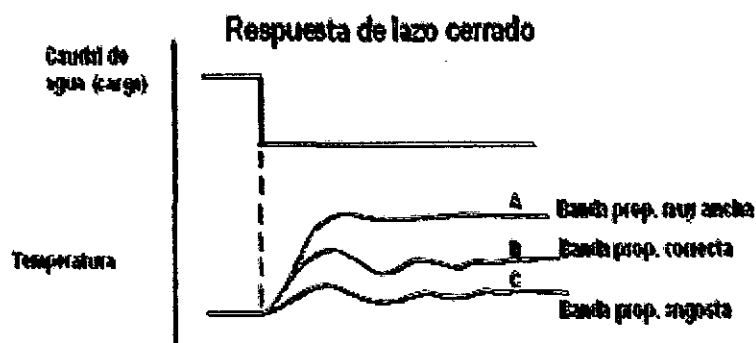


Figura 1-10 RESPUESTA DE LAZO CERRADO

La figura muestra varios ejemplos de bandas proporcionales variadas para el intercambiador de calor. Idealmente, la banda proporcional correcta producirá una

amortiguación de amplitud de cuarto de ciclo en cada ciclo, en el cual cada medio ciclo es  $\frac{1}{2}$  de la amplitud del medio ciclo previo. La banda proporcional que causará una amortiguación de onda de un cuarto de ciclo será menor, y por lo tanto alcanzará un control más ajustado sobre la variable medida, a medida que el tiempo muerto en el proceso decrece y la capacidad se incrementa.

Una consecuencia de la aplicación del control proporcional al lazo básico de control es el offset. Offset significa que el controlador mantendrá la medida a un valor diferente del valor de consigna. Esto es más fácilmente visto al observar la figura. Note que si la válvula de carga es abierta, el caudal se incrementará a través de la válvula y el nivel comenzará a caer, de manera de mantener el nivel, la válvula de suministro debería abrirse, pero teniendo en cuenta la acción proporcional del lazo el incremento en la posición de apertura puede sólo ser alcanzado a un nivel menor. En otras palabras, para restaurar el balance entre el caudal de entrada y el de salida, el nivel se debe estabilizar a un valor debajo del valor de consigna (o setpoint). Esta diferencia, que será mantenida por el lazo de control, es llamada offset, y es característica de la aplicación del control proporcional único en los lazos de realimentación. La aceptabilidad de los controles sólo-proporcionales dependen de si este valor de offset será o no tolerado, ya que el error necesario para producir cualquier salida disminuye con la banda proporcional, cuanto menor sea la banda proporcional, menor será el offset. Para grandes capacidades, aplicaciones de tiempo muerto pequeñas que acepten una banda proporcional muy estrecha, el control sólo-proporcional será probablemente satisfactorio dado que la medición se mantendrá a una banda de un pequeño porcentaje alrededor del valor de consigna. Si es esencial que no haya una diferencia de estado estable entre la medición y el valor de consigna bajo todas las condiciones de carga, una función adicional deberá ser agregada al controlador.

#### 1.4.11.3 ACCIÓN INTEGRAL (RESET)

Esta función es llamada acción integral o reset. La respuesta del lazo abierto del modo reset es mostrada en la figura que sigue, que indica un escalón de cambio en algún instante en el tiempo. En tanto que la medición estuviera en su valor de consigna, no existiría ningún cambio en la salida debido al modo de reset en el controlador.

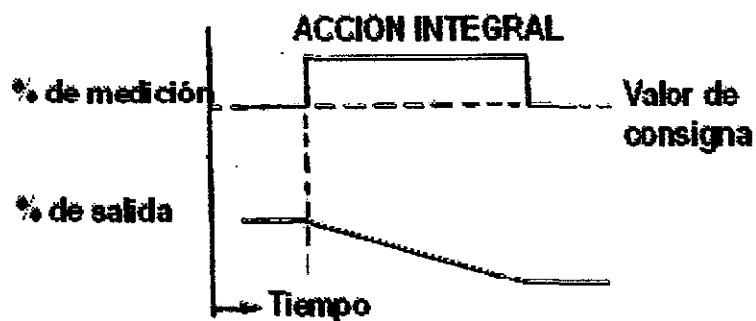


Figura 1-11 ACCIÓN INTEGRAL

Sin embargo, cuando cualquier error exista entre la medición y el valor de consigna, la acción de reset hace que la salida comience a cambiar y continúe cambiando en tanto el error exista. Esta función, entonces, actúa sobre la salida para que cambie hasta un valor correcto necesario para mantener la medición en el valor de consigna a varias cargas sea alcanzado. Esta respuesta es agregada a la banda proporcional del controlador según se muestra en la figura siguiente. El escalón de cambio en la medición primero produce una respuesta proporcional, y luego una respuesta de reset es agregada a la proporcional. Cuanta más acción de reset o integral exista en el controlador, más rápido cambia la salida en función del tiempo. Entre las varias marcas de controladores, la salida de acción integral es medida de una o dos maneras, tanto en minutos por repetición, o en número de repeticiones por minuto. Para aquellos controladores que miden en minutos por repetición, el tiempo de reset es la cantidad de tiempo necesaria para que dicho modo repita la respuesta del lazo abierto causada por el modo proporcional para un paso de cambio de error. Así, para estos controladores, cuanto menor sea el número de reset, mayor será la acción del modo reset. En aquellos controladores que miden la acción de reset en repeticiones por minuto, el ajuste indica cuantas repeticiones de la acción proporcional son generados por el modo de reset en un minuto. Así, para dichos controladores cuanto mayor sea el número reset, mayor será la acción integral. El tiempo de reset es indicado en la figura.

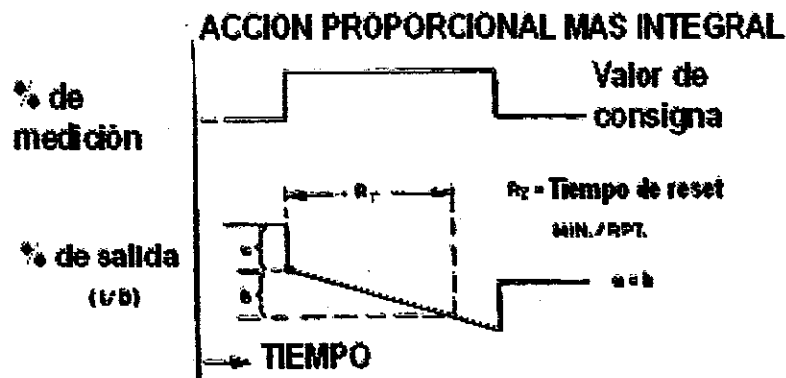


Figura 1-12 ACCIÓN PROPORCIONAL - INTEGRAL

La correcta cantidad de acción reset depende de cuán rápido la medición puede responder al recorrido adicional de válvula que la misma causa.

El controlador no debe comandar la válvula más rápido que el tiempo muerto en el proceso, permitiendo que la medición responda, o de otra manera la válvula ira a sus límites antes de que la medición pueda ser retornada nuevamente al valor de consigna. La válvula se mantendrá entonces en su posición extrema hasta que la medición cruce el valor de consigna en la dirección opuesta. El resultado será un ciclo de reset en el cual la válvula se desplaza de un extremo al otro a medida que la medición oscila alrededor del valor de consigna. Cuando el reset es aplicado en los controladores en procesos en serie en que la medición está alejada del valor de consigna por largos períodos entre series, el reset puede llevar la salida a un máximo resultando en una oscilación de reset. Cuando la próxima serie se inicie, la salida no alcanzará su máximo hasta que la medición cruce el valor de consigna produciendo grandes desviaciones. El problema puede ser prevenido mediante la inclusión de una "llave de serie" en el controlador.

#### 1.4.11.4 ACCIÓN DERIVATIVA

La tercera respuesta encontrada en controladores es la acción derivativa. Así como la respuesta proporcional responde al tamaño del error y el reset responde al tamaño y duración del error, el modo derivativo responde a la cuán rápido cambia el error. En la figura, dos respuestas derivativas son mostradas.



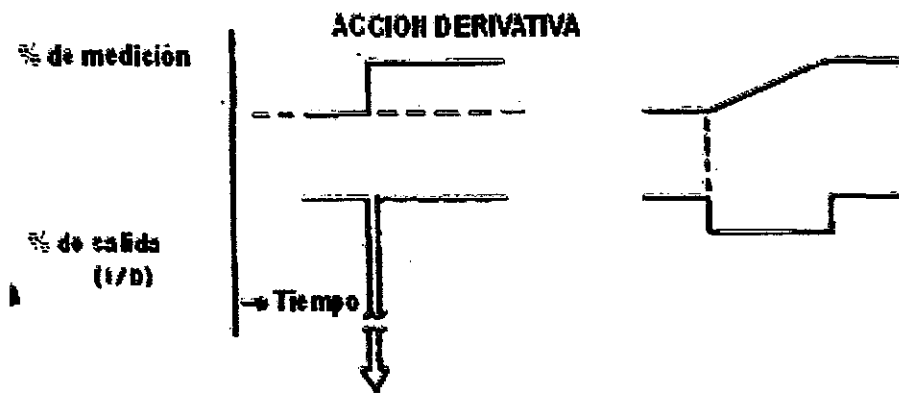


Figura 1-13 ACCIÓN DERIVATIVA

La primera es una respuesta a un corte en la medición alejada del valor de consigna. Para un escalón, la medición cambia en forma infinitamente rápida, y el modo derivativo del controlador produce un cambio muy grande y repentino en la salida, que muere inmediatamente debido a que la medición ha dejado de cambiar luego del escalón. La segunda respuesta muestra la respuesta del modo derivativo a una medición que está cambiando a un régimen constante. La salida derivativa es proporcional al régimen de cambio de éste error. Cuanto mayor sea el cambio, mayor será la salida debido a la acción derivativa. La acción derivativa mantiene ésta salida mientras la medición esté cambiando. Tan pronto como la medición deja de cambiar, esté o no en el valor de consigna, la respuesta debido a la acción derivativa cesará. Entre todas las marcas de controladores, la respuesta derivativa es comúnmente medida en minutos como se indica en la figura.

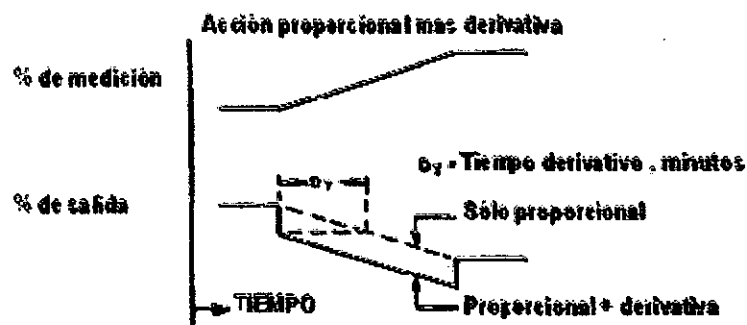


Figura 1-14 ACCIÓN PROPORCIONAL MAS DEERIVATIVA

El tiempo derivativo en minutos es el tiempo que la respuesta proporcional del lazo abierto más la respuesta derivativa está delante de la respuesta resultante del valor

proporcional solamente. Así, cuanto más grande sea el número derivativo mayor será la respuesta derivativa. Los cambios en el error son un resultado de los cambios tanto en el valor de consigna como en la medición o en ambos. Para evitar un gran pico causado por las escalones de cambio en el valor de consigna, la mayoría de los controladores modernos aplican la acción derivativo sólo a cambios en la medición. La acción derivativa en los controladores ayuda a controlar procesos con constantes de tiempo especialmente grandes y tiempo muerto significativo, la acción derivativa es innecesaria en aquellos procesos que responden rápidamente al movimiento de la válvula de control, y no puede ser usado en absoluto en procesos con ruido en la señal de medición, tales como caudal, ya que la acción derivativa en el controlador responderá a los cambios bruscos en la medición que el mismo observa en el ruido. Esto causará variaciones rápidas y grandes en la salida del controlador, lo que hará que la válvula esté constantemente moviéndose hacia arriba o hacia abajo, produciendo un desgaste innecesario en la misma.

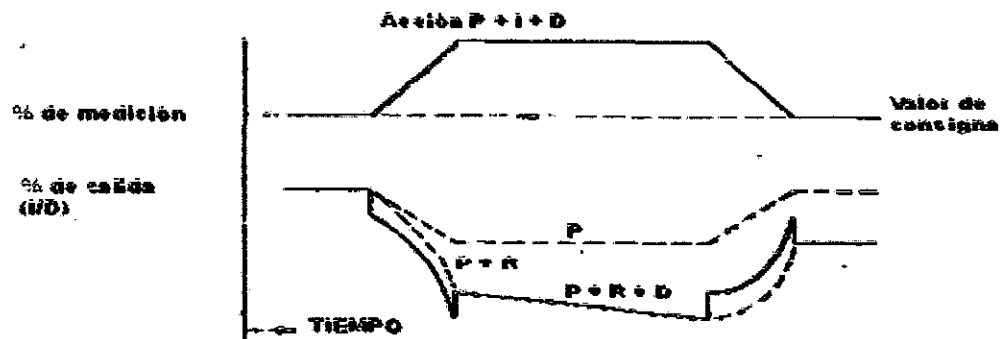


Figura 1-15 ACCIÓN PROPORCIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVO

La figura muestra una acción combinada de respuesta proporcional, reset y acción derivativa para la medición de temperatura de un intercambiador de calor simulado que se desvía del valor de consigna debido a un cambio de carga. Cuando la medición comienza a desviarse del valor de consigna, la primera respuesta del controlador es una respuesta derivativa proporcional al régimen de variación de la medición que se opone al movimiento de la medición al alejarse del valor de consigna. La respuesta derivativa es combinada con la respuesta proporcional agregada, a medida que el reset en el controlador ve el error incrementarse, el mismo controla la válvula más fuerte aún. La acción continúa hasta que la medición deja de cambiar, entonces la acción derivativa se detiene. Dado que existe aún un error, la medición continúa cambiando debido al reset, hasta que la medición

comienza a retornar hacia el valor de consigna. Tan pronto como la medición comienza a moverse retornando hacia el valor de consigna, aparece una acción derivativa proporcional al régimen de cambio en la variación oponiéndose al retorno de la medición hacia el valor de consigna. La acción integral o reset continúa debido a que aún existe un error, a pesar de que su contribución disminuye con el error. Además, la salida debido al valor proporcional está cambiando. Así, la medición retorna hacia el valor de consigna. Tan pronto como la medición alcanza el valor de consigna y deja de cambiar, la acción derivativa cesa nuevamente y la salida proporcional vuelve al 50%. Con la medición nuevamente en su valor de consigna, no existen más respuestas a variaciones debidas al reset. Sin embargo, la salida está ahora a un nuevo valor. El nuevo valor es el resultado de la acción de reset durante el tiempo en que la medición se alejó del valor de consigna, y compensa el cambio de carga que fue causado por la alteración original.

## 1.5 CONTROLADOR PID

Todos los modos descritos, tanto como el simple controlador On/Off, usan la misma señal de error. Sin embargo, cada uno de ellos usa diferentes caminos:

- El modo de control On/Off usa información sobre la presencia del error.
- El modo proporcional usa información sobre la magnitud del error.
- El modo integral usa información sobre el error promedio en un período de tiempo.
- El modo derivativo usa información sobre la velocidad en el cambio del error.

En todos los casos, el objetivo es mantener a la variable controlada tan cerca al punto de referencia como sea posible.

La acción derivativa es generalmente usada en conjunto con una acción proporcional e integral. Este tipo de controlador resultante es llamado "controlador PID" denominado controlador trimodo.

Si se puede obtener el modelo matemático del proceso, entonces es posible aplicar varias técnicas para determinar los parámetros de este cumpliendo con las especificaciones transitorias y de estado estacionario del sistema de control de lazo cerrado. Sin embargo si el proceso es tan complicado no encontrando su modelo matemático, es imposible el método analítico de diseño de un controlador PID.

Se debe recurrir a modelos experimentales para el diseño de controladores PID. Este proceso se conoce como calibración o sintonía del controlador. ZIEGLER y Nichols sugirieron reglas para afinar controladores PID.

Consideremos un lazo de control de una entrada y una salida de un grado de libertad:

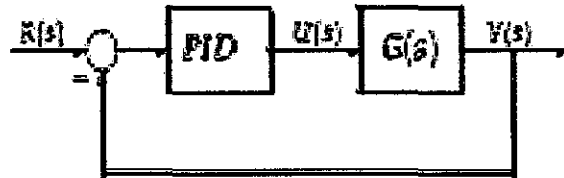


Figura 1-16 DIAGRAMA DE BLOQUES

Los miembros de la familia de controladores PID, incluyen tres acciones: proporcional (P), integral (I) y derivativa (D). Estos controladores son los denominados P, I, PI, PD y PID.

**P:** Acción de control proporcional, da una salida del controlador que es proporcional al error, es decir:  $u(t) = K_p \cdot e(t)$ , que describe desde su función transferencia queda:

$$C_p(s) = K_p$$

Ecuación 1

Donde  $K_p$  es una ganancia proporcional ajustable. Un controlador proporcional puede controlar cualquier planta estable, pero posee desempeño limitado y error en régimen permanente (off-set).

**I:** Acción de control integral: da una salida del controlador que es proporcional al error acumulado, lo que implica que es un modo de controlar lento.

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt$$

$$C_p(s) = \frac{K}{s}$$

Ecuación 2

La señal de control  $u(t)$  tiene un valor diferente de cero cuando la señal de error  $e(t)$  es cero. Por lo que se concluye que dada una referencia constante, o perturbaciones, el error en régimen permanente es cero.

**PI:** acción de control proporcional-integral, se define mediante donde  $T_i$  se denomina tiempo integral y es quien ajusta la acción integral.

Con un control proporcional, es necesario que exista error para tener una acción de control distinta de cero. Con acción integral, un error pequeño positivo siempre nos daría una acción de control creciente, y si fuera negativo la señal de control sería decreciente. Este razonamiento sencillo nos muestra que el error en régimen permanente será siempre cero.

$$u(t) = K_p(t) + \frac{K}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad \text{Ecuación 3}$$

donde  $T_i$  se denomina tiempo integral y es quien ajusta la acción integral. La función de transferencia resulta:

$$C_{pi}(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad \text{Ecuación 4}$$

Muchos controladores industriales tienen solo acción PI. Se puede demostrar que un control PI es adecuado para todos los procesos donde la dinámica es esencialmente de primer orden. Lo que puede demostrarse en forma sencilla, por ejemplo, mediante un ensayo al escalón.

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad \text{Ecuación 5}$$

**PD:** acción de control proporcional-derivativa, se define:

Donde  $T_d$  es una constante denominada tiempo derivativo. Esta acción tiene carácter de previsión, lo que hace más rápida la acción de control, aunque tiene la desventaja importante que amplifica las señales de ruido y puede provocar saturación en el actuador. La acción de control derivativa nunca se utiliza por sí sola, debido a que solo es eficaz durante periodos transitorios. La función transferencia de un controlador PD resulta:

$$CPD(s) = K_p + s K_p T_d \quad \text{Ecuación 6}$$

Cuando una acción de control derivativa se agrega a un controlador proporcional, permite obtener un controlador de alta sensibilidad, es decir que responde a la velocidad del cambio del error y produce una corrección significativa antes de que la magnitud del error se vuelva demasiado grande. Aunque el control derivativo no afecta en forma directa al error en estado estacionario, añade amortiguamiento al sistema y, por tanto, permite un valor más grande que la ganancia  $K$ , lo cual provoca una mejora en la precisión en estado estable.

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad \text{Ecuación 7}$$

y su función transferencia resulta:

$$C_{PID}(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + s T_d \right) \quad \text{Ecuación 8}$$

**PID:** acción de control proporcional-integral-derivativa, esta acción combinada reúne las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales. La ecuación de un controlador con esta acción combinada se obtiene mediante:

## 1.6 SINTONIZACION DE CONTROLADORES

### 1.6.1 REGLAS DE ZIEGLER & NICHOLS

Ziegler & Nichols propusieron reglas para determinar la ganancia proporcional, del tiempo integral  $T_i$  y del tiempo derivativo  $T_d$  basados en las características de la respuesta transitoria de un proceso dado.

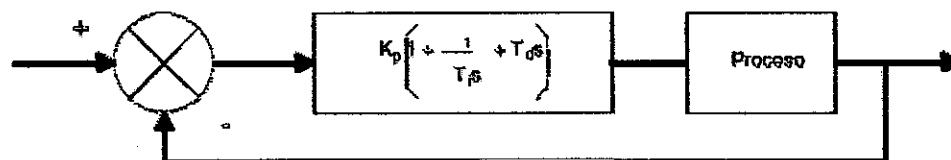


Figura 1-17 DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN SISTEMA REALIMENTADO

#### 1.6.1.1 Primer método

En este método se obtiene experimentalmente la respuesta del proceso a una perturbación cuya entrada es del tipo escalón unitario. Si el proceso no incluye integradores o polos dominantes complejos conjugados, la curva de respuesta al escalón unitario puede tener el aspecto de una curva en forma de S, si la respuesta no presenta la forma de S, no se puede aplicar el método. Estas curvas de respuesta al escalón se pueden generar experimentalmente o a partir de una simulación dinámica del proceso.

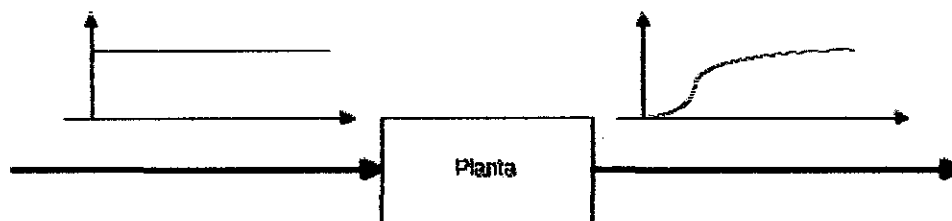


Figura 1-18 PRIMER METODO DE ZIEGLER & NICHOLS

La Curva en forma de S se caracteriza por dos parámetros, el tiempo de atraso  $L$  y la constante de tiempo  $T$ . Ambos se determinan trazando una línea tangente a la curva en forma de S en el punto de inflexión y se harán las intersecciones de esta línea tangente con el eje del tiempo y con la línea  $c(t)=K$ , como se muestra en la Figura. Entonces la función

de transferencia  $C(S)/U(S)$  se puede aproximar por un sistema de primer orden con atraso de transporte.

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{K e^{-Ls}}{Ts + 1}$$

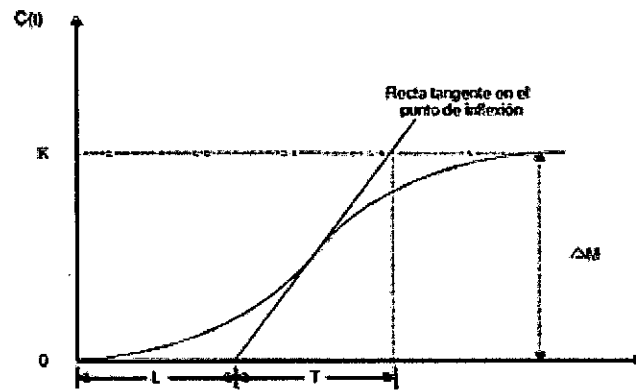


Figura 1-19 RESPUESTA EN FRECUENCIA

Ziegler&Nichols sugirieron fijar los valores  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$  de acuerdo con la fórmula de la tabla 1.

Tipo de Controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{I}{L}$	$\infty$	0
PI	$0.9 \frac{I}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{I}{L}$	$2L$	$0.5L$

Tabla 1-1 VALORES PROPUESTOS POR ZIEGLER & NICHOLS



$$G(S) = Kp(1 + 1/TiS + Tds)$$

Ecuación 9

$$= 1,2 (T/L) (1 + 1/2Ls + 0,5Ls)$$

$$= 0,6 T (s + 1/L)^2 / s$$

Así el controlador PID tiene un polo en el origen y un cero doble en  $s = -1/L$

### 1.6.1.2 Segundo método

Primero se hace  $Ti = 0$  y usando solamente la acción de control proporcional incrementa  $Kp$  desde 0 hasta un valor crítico  $Kcr$  en la cual exhiba por primera vez oscilaciones sostenidas. Si no se presenta oscilaciones sostenidas para cualquier valor, entonces no se puede aplicar este método. Así, se determina experimentalmente la ganancia crítica  $Kcr$  y el periodo correspondiente. Ziegler y Nichols sugirieron fijar los valores de  $Ti$  y  $Td$  de acuerdo a la fórmula de la Tabla 2.

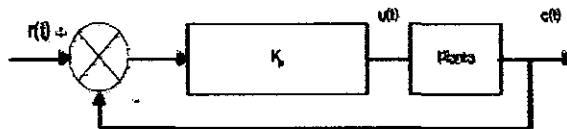


Figura 1-20 SEGUNDO METODO DE ZIEGLER NICHOLS

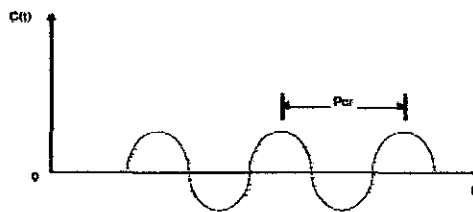


Figura 1-21 RESPUESTA AL SISTEMA

La sintonización del controlador PID mediante el segundo método de Ziegler y Nichols es:

$$G(s) = Kp (1 + 1/Tis + Tds)$$

Ecuación 10

Tipo de Controlador	Kp	Ti	Td
P	$0,5 K_{cr}$	$\infty$	0
PI	$0,45 K_{cr}$	$p_{cr} / 1,2$	0
PID	$0,6 K_{cr}$	$0,5 p_{cr}$	$0,125 p_{cr}$

$$= 0,6 K_{cr} ( 1 + 1 / 0,5 p_{cr}s + 0,125 p_{cr}s )$$

$$= 0,075 K_{cr} p_{cr} ( s + 4 / p_{cr} )^2 / s$$

Tabla 1-2 VALORES PROPUESTOS POR ZIEGLER NICHOLS

## 1.6.2 CALIBRACION Y SINTONIA DE CONTROLADORES

El término de calibración de controladores, instrumentos y válvulas automáticas, debe ser entendido como la demostración práctica de dar una respuesta esperada frente a perturbaciones conocidas.

El hecho de calibrar un controlador significa verificar la correcta operación de alguna acción de control, sea proporcional, integral o derivativo.

Frente a una señal de entrada simulada, debe observarse la respuesta correspondiente a un conjunto de valores adoptados para las acciones proporcionales, integrales o derivativas.

Cualquier desvío del comportamiento será debido a la calibración del controlador. Los manuales de instrucción del fabricante determinarán en detalle las medidas correctivas. Esta operación será realizada independientemente del proceso a controlar.

El término "sintonía de controladores", se refiere al hecho de encontrar un conjunto de valores para las acciones PI y PD las cuales posibilitan a un controlador operar de manera eficiente y armoniosa con un dato particular del proceso. Si el mismo controlador fuese removido para operar, otro proceso diferente, su calibración podrá persistir, pero la sintonía deberá hacerse nuevamente.

La sintonía de controladores es un asunto de los menos comprendidos y de los más pobremente practicados, aunque sea extremadamente importante en la aplicación de controladores automáticos.

El objetivo a seguir es presentar diversos procedimientos necesarios para el ajuste ideal de controladores. No existe un consenso unánime sobre el mejor método. Por otro lado, el asunto no debe ser tratado de manera puramente empírica como suele acontecer.

### 1.6.3 MÉTODO SINTONÍA EN MALLA ABIERTA

#### 1.6.3.1 Método de la Curva de Reacción del Proceso

Este método introduce una sola perturbación en el proceso. En realidad el controlador no está insertado en el lazo cuando el proceso es perturbado.

El método permite conocer la reacción exclusiva del proceso sin la actuación del controlador. A partir de los datos obtenidos, para caracterizar el proceso, son dados los parámetros para ajustes del controlador. En general se provoca un pulso en la salida del controlador y se registra la curva de reacción del proceso.

La mayoría de las curvas de reacción del proceso pueden generalmente ser aproximadas por la composición de una curva de sistema de primer orden más un atraso puro. Combinaciones de atraso puro con sistema de orden más elevado, aunque teóricamente posibles, son difíciles de aproximar con relativa exactitud. La aproximación por sistema de primer orden en general resulta suficientemente exacta para efectos prácticos.

MODOS	PROPORCIONAL	INTEGRAL	DERIVATIVO
P	$K_C = 1/L_r R_r$		
P + I	$K_C = 0,9/L_r R_r$	$T_i = 3,33L_r$	
P + I + D	$K_C = 1,2/L_r R_r$	$T_i = 2,0L_r$	$T_d = 0,5L_r$

Tabla 1-3 ECUACIONES EMPÍRICAS PARA AJUSTES DE CONTROLADORES PROPUESTOS POR ZIEGLER & NICHOLS

### 1.6.3.2 DEFINICIÓN DE BUEN CONTROL

Esta definición representa la primera dificultad sobre el término sintonía o buen control. Para dificultar aún más esta definición puede variar de proceso a proceso.

La sintonía de controladores es realizada sobre observaciones en dominio tiempo. Varios criterios de evaluación pueden ser adoptados, conforme muestra la tabla 4.

1. Razón de decaimiento	$RD =$	$\frac{\text{altura 2º pico}}{\text{altura 1º pico}}$
2. Mínima integral del error al cuadrado	$ISE =$	$\int_0^{\infty} [e(t)]^2 dt$
3. Mínima integral del error absoluto	$IAE =$	$\int_0^{\infty}  e(t)  dt$
4. Mínima integral del tiempo y error absoluto	$ITAE =$	$\int_0^{\infty}  e(t)  t dt$

Tabla 1-4 CRITERIOS DE EVALUACIÓN

El primer criterio tiene la ventaja de ser fácilmente observable únicamente en dos puntos de la respuesta a una perturbación salto. Los demás criterios integrales tienen la ventaja de ser precisos.

Una sola combinación de parámetros puede producir una razón de decaimiento 1:4, más solamente una única combinación minimiza el respectivo criterio integral.

La razón de decaimiento 1:4 es usual y representa un compromiso adecuado entre rápida ascensión y corta estabilización, como se muestra en la Figura.

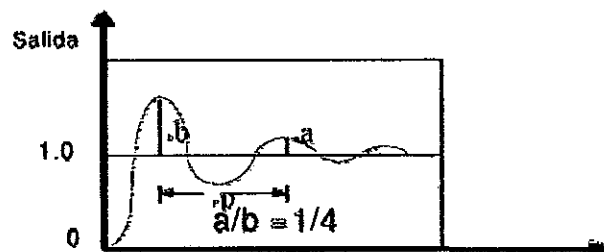


Figura 1-22 RAZÓN DE DECAIMIENTO

Algunas diferencias pueden ser notadas entre los métodos integrales. ISE es conveniente en los desvíos grandes; minimizar ISE favorecerá procesos con rápido ascenso (consecuentemente siendo menos amortiguados). ITAE es conveniente en pequeños desvíos ocurridos bastante tarde; minimizar ITAE favorece procesos con corta estabilización (consecuentemente bastante amortiguados). IAE es intermedio y la respuesta correspondiente tiene razón de decaimiento próxima de 1:4.

Los procedimientos de sintonía, se dividen en dos clases; los de lazo cerrado, donde los parámetros son obtenidos con el proceso bajo la acción del controlador en automático y los de lazo abierto, donde los parámetros son obtenidos de la respuesta del proceso en lazo abierto o comúnmente llamada curva de reacción del proceso. El controlador puede no estar instalado para realizar los ajustes.

### 1.6.3.3 Método de Sintonía en Malla Cerrada

### 1.6.3.4 Método del Periodo Límite (Ultimate Method)

Este fue uno de los primeros métodos propuestos para sintonía de controladores, relatados en 1942 por Ziegler & Nichols. Se basa en determinar características individuales y únicas del proceso a ser controlado pudiendo expresar su comportamiento dinámico.

Estas características son denominadas periodo límite (ultimate period) y ganancia límite (Ultimate gain or sensitivity). Por definición, la ganancia ( $K_u$ ) es el mayor valor admisible de un controlador con acción proporcional solamente, para lo cual el mismo sistema es estable. El periodo límite ( $P_u$ ) es el correspondiente periodo de respuesta obtenido con la ganancia ajustada a su mayor valor admisible.

Conforme demuestra la figura, existe un único valor de ganancia ( $K_u$ ) capaz de producir oscilaciones estables, según la curva B. Valores mayores de ganancia producen oscilaciones inestables y crecientes, curva A. Valores menores producen amortiguaciones, curva C. Obtenidos  $K_u$  y  $P_u$  se cuenta con la información suficiente para comparar el comportamiento dinámico de diferentes procesos. Por esta razón el método consigue establecer un valor numérico único para el comportamiento dinámico del proceso, en lugar de observaciones subjetivas.

Reg. 6354 - 12/11/15 UNP

Por otro lado, por sucesivos ensayos y pruebas, se verificará empíricamente la correlación ideal entre la ganancia límite y la fracción del mismo aplicado al controlador para obtener oscilaciones amortiguadas 1:4.

$$K_c = 0,5 K_u$$

ó

$$B_P = 2,0 B_P u$$

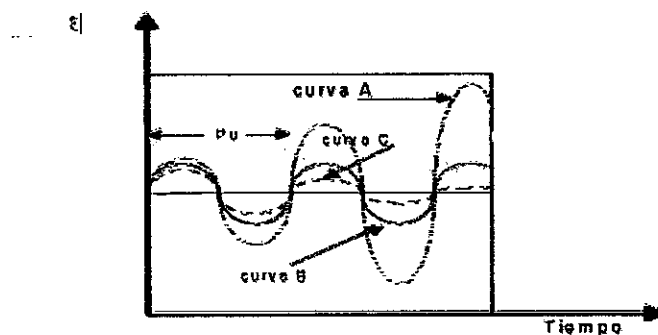


Figura 1-23 COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE DIFERENTES PROCESOS

Por procedimiento de pruebas análogas fueron determinados los ajustes para controladores dotados de otras acciones de control (ver tabla 5).

La inclusión de otras acciones modifica el ajuste para el controlador proporcional esto debido a la contribución de las acciones integral y derivativa.

Las ecuaciones mostradas en la tabla 5 son empíricas y pueden ocurrir excepciones.

MODOS	PROPORCIONAL	INTEGRAL	DERIVATIVO
P	$K_c = 0.50.K_u$		
P + I	$K_c = 0.45.K_u$	$T_i = P_u / 1.2$	
P + D	$K_c = 0.60.K_u$		$T_d = P_u / 8$
P + I + D	$K_c = 0.60.K_u$	$T_i = P_u / 2.0$	$T_d = P_u / 8$

Tabla 1-5 ECUACIONES EMPÍRICAS PARA AJUSTES DE CONTROLADORES

## 1.7 CONCEPTOS BASICOS DE PROCESAMIENTO DE IMAGENES<sup>2</sup>

### 1.7.1 Imagen

Es la proyección en perspectiva en el plano bidimensional de una escena tridimensional en un determinado instante de tiempo  $t_0$ .

### 1.7.2 Fotograma

Es una matriz bidimensional de valores de intensidad luminica obtenidos para un tiempo  $t_0$  constante. Pudiera decirse en cierta forma que es una imagen discretizada.

### 1.7.3 Píxel (Picture Element)

Es cada de una de las posiciones en que es discretizada una imagen, o lo que es lo mismo, cada una de las posiciones de un cuadro.

### 1.7.4 Imagen binaria

Son aquellas imágenes cuyos píxeles solo tienen dos valores: cero y uno.

## 1.7.5 LA IMAGEN DIGITAL<sup>3</sup>

### 1.7.5.1 Fundamentos de las imágenes digitales

Son el principal ingrediente de lo que se conoce como Visión Artificial y representan mediante algún tipo de codificación, normalmente en una matriz de números de dos dimensiones, una escena del entorno.

Existen dos tipos de imágenes utilizadas frecuentemente en Visión Artificial: imágenes de intensidad e imágenes de alcance (también llamadas imágenes de profundidad o perfiles de superficie). Las imágenes de intensidad miden la cantidad de luz que incide en un dispositivo fotosensible, mientras que las imágenes de alcance estiman directamente la estructura en tres dimensiones (3D) de la escena ya que su fundamento radica en el uso de sensores de alcance ópticos y algún fenómeno físico para adquirir la imagen. Un ejemplo típico de una imagen de intensidad es una fotografía, mientras que de una imagen de alcance es, por ejemplo, la imagen que obtiene el oftalmólogo sobre el grado de rugosidad de la córnea de un paciente o las imágenes de un radar.

Aunque la filosofía de las diferentes tipos de imágenes es diferente, en cualquier caso, tras su captura tendremos una matriz de valores en dos dimensiones (2D), es decir, una *imagen digital*.

<sup>2</sup>Rafael C. Gonzales, Richard E. Woods, "Tratamiento Digital de Imágenes"

<sup>3</sup>Gonzalo Pajares Martinsanz, Jesús Manuel de la Cruz García, José Manuel motina pascual, Juan Cuadrado Pardo, Alejandro López Correa, "Imágenes digitales - Procesamiento practico con java"

### 1.7.6 Dispositivos de captura de imágenes

Para la adquisición de imágenes digitales se requieren dos elementos básicos. El primero es un dispositivo físico que es sensible a una determinada banda del espectro de energía electromagnético (tal como rayos X, ultravioleta, visible, infrarrojo, etc.) y que produce una señal eléctrica de salida proporcional al nivel de energía incidente en cualquier instante de tiempo. El segundo, denominado digitalizador, es un dispositivo que cumple la función de convertir la señal eléctrica continua de salida del dispositivo físico en un conjunto discreto de localizaciones del plano de la imagen y, después, en la cuantización de dicha muestra. Esto implica, en primer lugar, determinar el valor de la imagen continua en cada una de las diferentes localizaciones discretas de la imagen (cada valor localizado de forma discreta se denomina muestra de la imagen) y, luego, asignar a cada muestra una etiqueta entera discreta, que es representativa del rango en el que varía la muestra.

Una vez capturada la señal continua y cuantificada espacialmente y en amplitud, se obtiene una imagen digital, que es como se representa en el computador, es decir, tendremos la matriz (2D) de números como ya hemos mencionado anteriormente. Éstos son los valores que se manipulan para extraer información de las imágenes mediante programas (software).

En la siguiente figura se ilustra un ejemplo de la cuantización espacial y en amplitud:



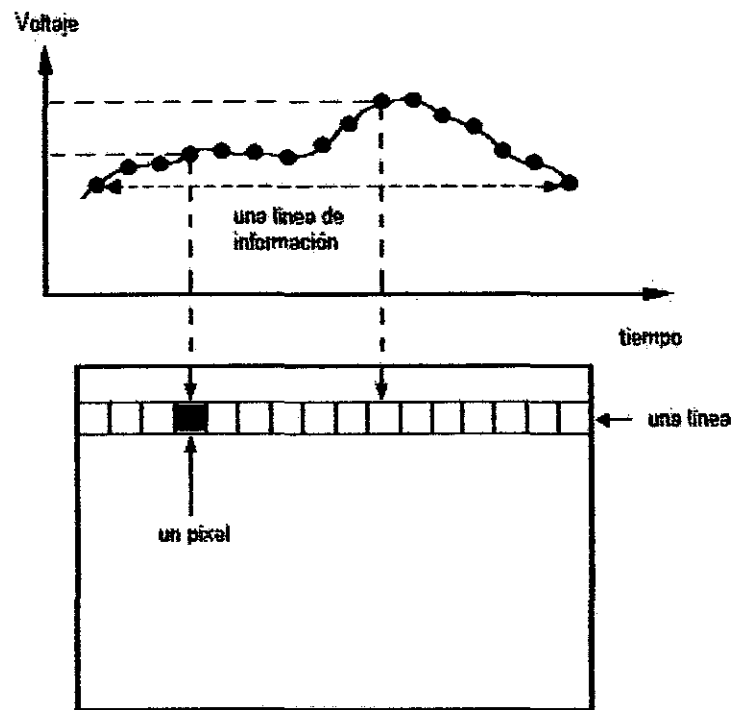


Figura 1-24 DIGITALIZACIÓN DE UNA SEÑAL ANALÓGICA

Supongamos que tenemos una señal analógica, que bien podría ser una línea de video analógica. Esta señal (línea) analógica de video se convierte a una imagen digital muestreando la señal analógica a intervalos determinados. El procedimiento consiste en medir el voltaje de la señal a intervalos de tiempo fijos. El valor del voltaje en cada instante se convierte a un número que es almacenado y se corresponde con la intensidad de la imagen en ese punto. La intensidad en cada punto depende tanto de las propiedades intrínsecas del objeto que se está viendo como de las condiciones de luz de la escena. Repitiendo este procedimiento para todas las líneas de video que constituyen una imagen, se pueden grabar los resultados obtenidos en el computador, de suerte que habremos conseguido una imagen digital que, en definitiva, es una matriz de números.

La imagen puede accederse como una matriz bidimensional (2D) de datos, donde cada punto o dato se denomina píxel.

Además de las cámaras de televisión que generan una imagen de video, uno de los sensores más usados para la visión artificial son los dispositivos de acoplamiento de carga (*Charge Coupled Devices* - CCD). Entre los dispositivos CCD, que generalmente también producen una señal continua de video, cabe distinguir dos categorías: sensores de exploración de línea y sensores de exploración de área. Estos sensores CCD se basan en

unos elementos semiconductores llamados *photosites*. Los fotones procedentes de la escena excitan el elemento semiconductor, de forma que el grado de excitación es proporcional a la cantidad de carga acumulada en el *photosite* y, por lo tanto, a la intensidad luminosa en ese punto.

Estos *photosites* se pueden representar en forma de matriz como se muestra en la siguiente figura:

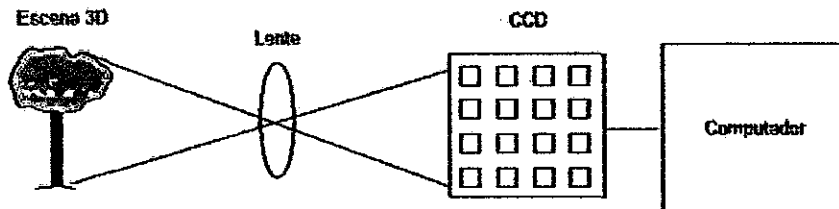


Figura 1-25 CAPTURA DE UNA IMAGEN 3D POR UN DISPOSITIVO CCD

Supongamos una matriz de *photosites* situados detrás de una lente y sobre los que se proyecta una imagen procedente de la escena 3D. La señal de estos sensores se procesa en el propio sensor (cámara) o en otro dispositivo (tarjeta de procesamiento de imágenes digitales) y los valores digitales se envían al computador.

Para clarificar un poco más estos conceptos, analicemos el ejemplo sencillo mostrado en la figura siguiente:

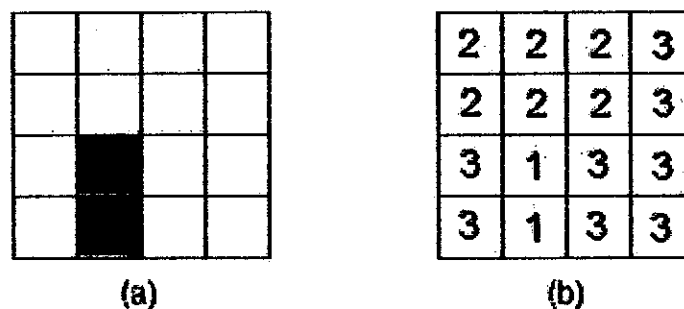


Figura 1-26 FIGURA DEL ÁRBOL CAPTURADA POR UNA CÁMARA CON 4X4 SENSORES DE INTENSIDAD

Supongamos una escena 3D cuya representación digital en forma de matriz, tal como se almacena en el computador, resulta ser la que se muestra en la figura 3-(b). En este caso se utiliza una matriz de 16 elementos (4x4) para representar el árbol; lógicamente, cuantos más sensores dispongamos en la cámara, más precisión podemos tener en la reproducción de la imagen. Esto es lo que se conoce como resolución espacial de la imagen.

### 1.7.7 Imágenes Blanco/Negro y color

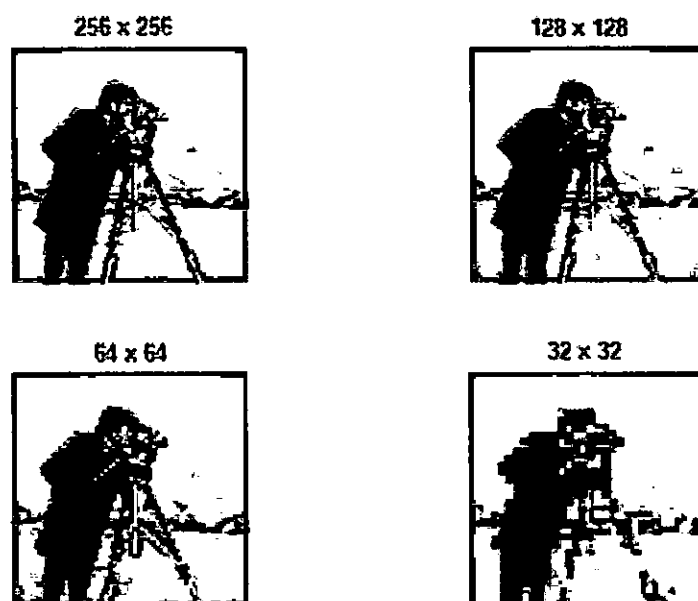
En definitiva e independientemente del tipo de sensor utilizado, la imagen que ha de ser tratada por el computador se presenta digitalizada espacialmente en forma de matriz con una resolución de  $M \times N$  elementos.

Si la imagen es en Blanco y Negro (B/N), se almacena un valor por cada píxel. Se suele utilizar un rango de valores para su representación, que generalmente es de 0 a  $2^n - 1$ . Uno de los valores más utilizados de  $n$  es 8; esto significa que el rango de valores para este caso varía de 0 a 255. En este caso, el 0 representa el negro absoluto y el 255, el blanco absoluto. Esto indica que podemos tener una resolución o precisión en los grises posibles de 256. El hecho de utilizar 256 niveles es porque con 8 bits del computador se pueden codificar 256 valores distintos desde la combinación 00000000, que representa el nivel 0, hasta la combinación 11111111, que representa el nivel 255.

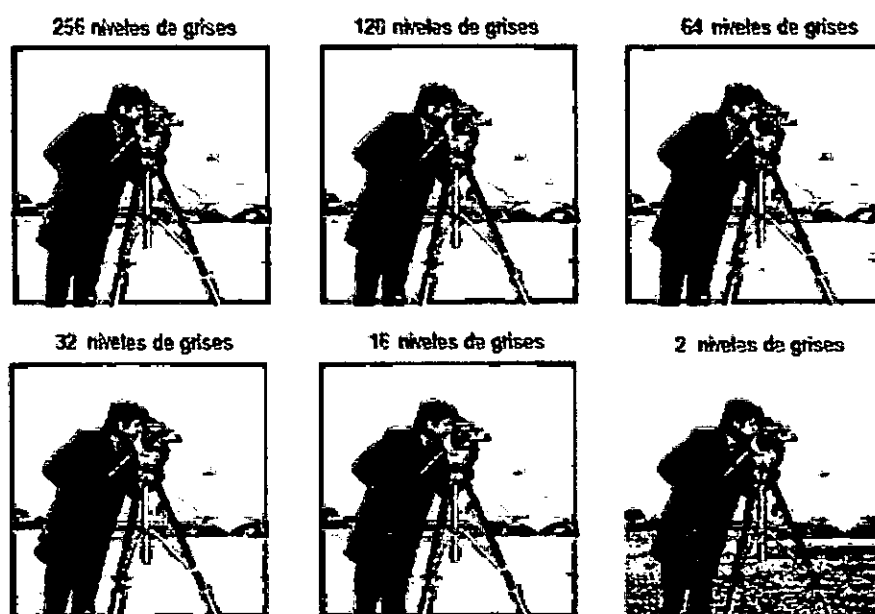
En el caso de las imágenes en color, los elementos de la matriz vienen dados por tres valores, que representan cada uno de los componentes básicos del color en cuestión. Estos componentes son el Rojo (R), Verde (G) y Azul (B), el conocido código RGB. En este caso el conjunto de valores (0,0,0) es el negro absoluto; el (255,255,255), el blanco absoluto; el (255,0,0), el rojo puro; el (0,255,0), el verde puro; el (0,0,255), el azul puro. Como es lógico, la combinación de distintos valores proporciona otros colores, por ejemplo, el (255,255,51) es un tono de amarillo o el (204,153,102), es un tono marrón. El número de colores posible resulta ser 255.

### 1.7.8 Resolución espacial y en amplitud

Para comprender mejor el sentido y la diferencia que existe entre resolución espacial y en amplitud, vamos a ilustrar los conceptos en las siguientes figuras:



*Figura 1-27 CUATRO REPRESENTACIONES DE LA MISMA IMAGEN CON VARIACIÓN EN EL NÚMERO DE PÍXELES UTILIZADOS*



*Figura 1-28 SEIS REPRESENTACIONES DE LA MISMA IMAGEN CON VARIACIÓN EN EL NÚMERO DE NIVELES DE GRIS UTILIZADOS*

Como se muestra en las figuras anteriores, dependiendo del número de píxeles que tenga el dispositivo y de niveles de grises con que se trabaje en el computador, la imagen poseerá más o menos resolución espacial y en amplitud respectivamente.

### 1.7.9 Representación de imágenes digitales

Como ya se ha mencionado antes, el termino imagen se refiere a una función de intensidad bidimensional, la cual puede ser representada como  $f(x, y)$ ,  $f(i, j)$ ,  $I(x, y)$ ,  $I(i, j)$ , etc., donde  $x$  e  $y$ , o bien,  $i$  y  $j$  son las coordenadas espaciales y el valor de  $f$  o  $I$  en cualquier punto  $(x, y)$  o  $(i, j)$  es proporcional a la intensidad o nivel de gris de la imagen en ese punto.

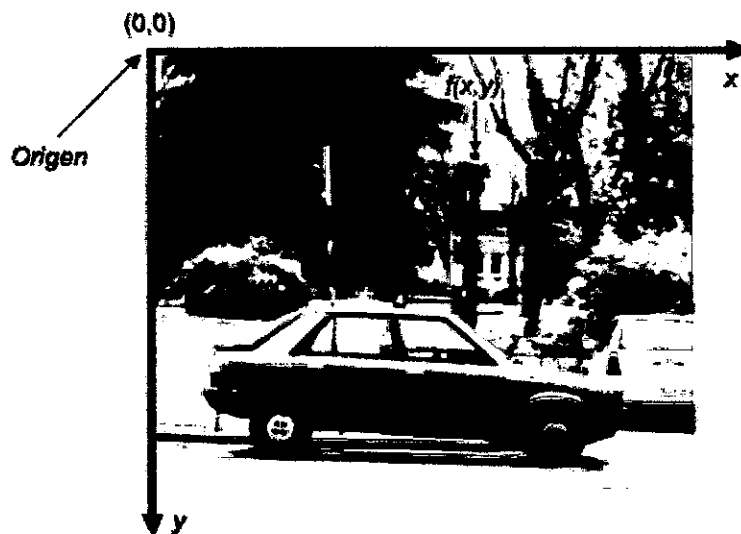


Figura 1-29 CONVENCION DE EJES UTILIZADA PARA LA REPRESENTACION DE IMAGENES DIGITALES

## 1.8 PROCESAMIENTO Y ANALISIS DE IMÁGENES DIGITALES

Aunque la distinción entre procesamiento y análisis de imágenes digitales no es obvia de forma inmediata, el procesamiento de imágenes puede ser visto como una transformación de una imagen a otra imagen, es decir, a partir de una imagen, se obtiene otra imagen modificada. Por otro lado, el análisis es una transformación de una imagen en algo distinto a una imagen; en consecuencia, el análisis es un determinado tipo de información representando una descripción o una decisión. En la mayoría de los casos, las técnicas de análisis de imágenes digitales son aplicadas a imágenes que han sido

procesadas previamente. Desde el punto de vista de un observador humano, el análisis de imágenes es una tarea fácil y rápida, algo que no ocurre en visión artificial. Igualmente, la capacidad de percepción humana permite procesar rápidamente una imagen para detectar en ella características de interés, por ejemplo, bordes o regiones.

## 1.9 PROCESAMIENTO BASICO DE IMÁGENES

El procesamiento de datos en el sistema de visión puede enfocarse desde 2 perspectivas:

- 1) Alteración píxel a píxel de los datos en una escala global (individuales).
- 2) Operaciones basadas en múltiples puntos (vecindad).

La generación de un nuevo píxel en una imagen será una función bien del valor de cada píxel en su localización individual, o bien de los valores de los píxeles en la vecindad de un píxel dado, como se indica en la figura siguiente:

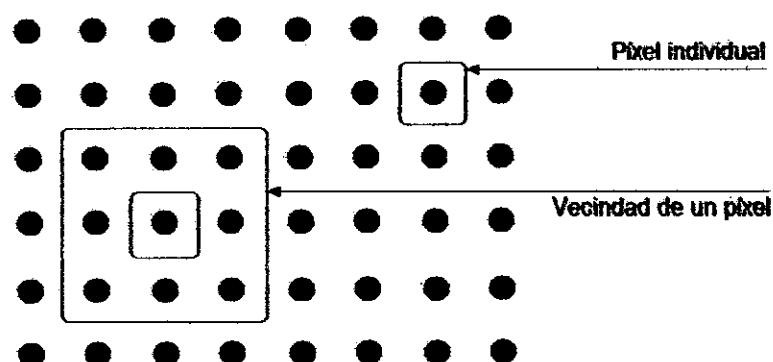


Figura 1-30 FUNCIONES DE PUNTO Y VECINDAD

Existen aún otras operaciones, que no se clasifican ni como individuales ni como vecindad ya que transforman las imágenes por otros procedimientos; son transformaciones que operan globalmente sobre los valores de intensidad de la imagen cuyo efecto es un realzado de la imagen original, operaciones aritméticas y lógicas, estas últimas basadas en la teoría del álgebra de Boole, y operaciones que realizan transformaciones geométricas, sin modificar los valores de intensidad.

### 1.9.1 OPERACIONES INDIVIDUALES

Las operaciones individuales implican la generación de una nueva imagen modificando el valor del píxel en una simple localización basándose en una regla global aplicada a cada localización de la imagen original. El proceso consiste en obtener el valor del píxel de una localización dada en la imagen, modificándolo por una operación lineal o no lineal y colocando el valor del nuevo píxel en la correspondiente localización de la imagen nueva. El proceso se repite para todas y cada de las localizaciones de los píxeles en la imagen original.

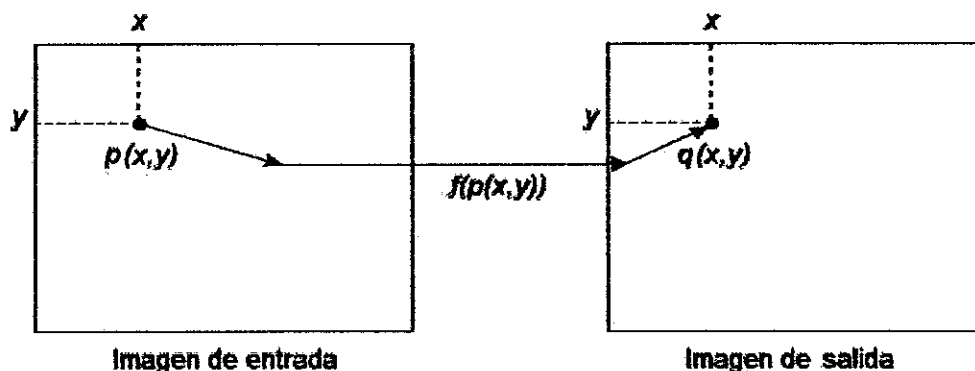


Figura 1-31 OPERACIÓN INDIVIDUAL

Como se aprecia en la figura anterior, el operador individual es una transformación uno a uno. El operador  $f$  se aplica a cada píxel en la imagen o sección de la imagen y la salida depende únicamente de la magnitud del correspondiente píxel de entrada; la salida es independiente de los píxeles adyacentes. La función transforma el valor del nivel de gris de cada píxel en la imagen y el nuevo valor se obtiene a través de la ecuación:

$$q(x,y) = f(p(x,y))$$

Ecuación 11

La función  $f$  puede ser un operador lineal o no lineal. El proceso matemático es relativamente simple. La imagen resultante es de la misma dimensión que la original.

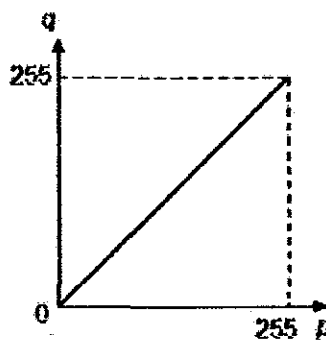
### 1.9.2 Operador Identidad

Este operador crea una imagen de salida que es idéntica a la imagen de entrada. La función de transformación es:

$$q = p$$

*Ecuación 12*

El operador identidad deja la imagen de entrada invariante. En la siguiente figura se muestra la función de transformación dada por la ecuación anterior:



*Figura 1-32 REPRESENTACIÓN DEL OPERADOR IDENTIDAD*

### 1.9.3 Operador Inverso o Negativo

Este operador crea una imagen de salida que es inversa de la imagen de entrada. Este operador es útil en diversas aplicaciones tales como imágenes médicas. Para una imagen con valores de gris en el rango de 0 a 255 la función de transformación resulta ser:

$$q = 255 - p$$

*Ecuación 13*

En la siguiente figura se muestra la función de transformación dada por la ecuación anterior:



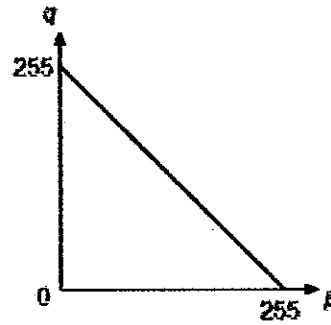


Figura 1-33 REPRESENTACIÓN DEL OPERADOR INVERSO

#### 1.9.4 Operador Umbral

Esta clase de transformación crea una imagen de salida binaria a partir de una imagen de grises, donde el nivel de transición está dado por el parámetro de entrada  $p_1$ . La función de transformación es la siguiente:

$$q = \begin{cases} 0 & \text{para } p \leq p_1 \\ 255 & \text{para } p > p_1 \end{cases} \quad \text{Ecuación 14}$$

En la siguiente figura se muestra la función de transformación dada por la ecuación anterior:

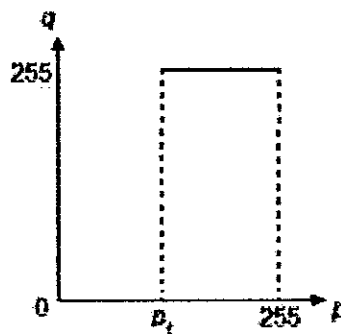


Figura 1-34 REPRESENTACIÓN DEL OPERADOR UMBRAL

### 1.9.5 TRANSFORMACIÓN DE VECINDAD

En las operaciones de vecindad modifican el nuevo valor del píxel en la imagen de salida depende de una combinación de los valores de los píxeles en la vecindad de la imagen original que está siendo transformada.

Dentro de la categoría de operaciones de vecindad se incluyen las operaciones de filtrado. Las operaciones de filtrado tienen la particularidad de eliminar un determinado rango de frecuencias de las imágenes.

#### 1.9.5.1 Nociones y propiedades de vecindad

$(x - 1, y - 1)$	$(x, y - 1)$	$(x + 1, y - 1)$
$(x - 1, y)$	$(x, y)$	$(x + 1, y)$
$(x - 1, y + 1)$	$(x, y + 1)$	$(x + 1, y + 1)$

Figura 1-35 VECINDAD DE UN PIXEL

Se dice que todo píxel  $p$ , de coordenadas  $(x, y)$ , tiene cuatro píxeles que establecen con él una relación de vecindad horizontal o vertical, que son:

Horizontal:  $(x - 1, y)$  y  $(x + 1, y)$     Vertical:  $(x, y - 1)$  y  $(x, y + 1)$

Estos cuatro píxeles definen lo que se conoce como entorno de vecindad-4 y nos referimos a ellos como  $E_4(p)$ .

Los cuatro vecinos diagonales de  $p$  tienen coordenadas:

$$(x-1, y-1), (x+1, y-1), (x-1, y+1), (x+1, y+1)$$

y nos referimos a ellos como  $E_D(p)$ . Estos píxeles junto con los  $E_4(p)$  se llaman los vecinos-8 de  $p$  y se denotan como  $E_8(p)$ .

Existen excepciones dadas cuando el píxel  $(x, y)$  es un punto del borde de la imagen, en cuyo caso algunos de los vecinos definidos anteriormente no existen.

### 1.9.5.2 Conectividad

Sea  $V$  el conjunto de valores de intensidad de los píxeles que se permiten estén adyacentes, por ejemplo, si sólo se desea que exista conectividad entre los píxeles con intensidades 80, 81 y 83, entonces  $V = \{80, 81, 83\}$ . Consideremos tres tipos básicos de conectividad:

*Conectividad-4.* Dos píxeles  $p$  y  $q$  con valores de  $V$  están *4-conectados* si  $q$  está en el conjunto  $E_4(p)$ .

*Conectividad-8.* Dos píxeles  $p$  y  $q$  con valores de  $V$  están *8-conectados* si  $q$  está en el conjunto  $E_8(p)$ .

*Conectividad- $m$  (mixta).* Dos píxeles  $p$  y  $q$  con valores de  $V$  están  *$m$ -conectados* si  $q$  está en el conjunto  $E_4(p)$  o  $q$  está en  $E_D(p)$  y  $E_4(p) \cap E_4(q) = \emptyset$ .

Un píxel  $p$  es contiguo a otro píxel  $q$  si están conectados. Se puede definir la adyacencia-4, 8 o  $m$ , dependiendo del tipo de conectividad especificada. Dos subconjuntos imagen  $S_1$  y  $S_2$  son contiguos si algún píxel de  $S_1$  es contiguo a algún píxel de  $S_2$ .

Un camino desde el píxel  $p$  con coordenadas  $(x, y)$  hasta un píxel  $q$  con coordenadas  $(s, t)$  es una secuencia de varios píxeles con coordenadas,

$$(x_0, y_0), (x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$$

donde  $(x_0, y_0) = (x, y)$  y  $(s, t), (x_i, y_i)$  son adyacentes a  $(x_{i-1}, y_{i-1})$ , con  $1 \leq i \leq n$ , y  $n$  es la longitud del camino. Se pueden definir caminos -4, 8 o m dependiendo del tipo de adyacencia usada.

Si  $p$  y  $q$  son píxeles de un subconjunto de imagen  $S$ , entonces  $p$  está conectado a  $q$  en  $S$  si existe un camino desde  $p$  hasta  $q$  formado de píxeles pertenecientes a  $S$ . Dado un píxel  $p$  cualquiera de  $S$ , el conjunto de píxeles de  $S$  que están conectados a  $p$  se llaman componente conectado de  $S$ . Se deduce que dos píxeles cualesquiera de un componente conectado están a su vez conectados entre sí y que los componentes conectados distintos son disjuntos.

Un camino simple es un camino sin píxeles repetidos y un camino cerrado es un camino simple en el cual el primer píxel es un vecino del último.

### 1.9.6 Operaciones de Filtrado

Las operaciones de filtrado basan su operatividad en la Convolución de la imagen utilizando el denominado núcleo de Convolución. Cabe distinguir dos tipos de filtros: paso alto y paso bajo, que en el contexto de la teoría de señales supone que los primeros dejan pasar las altas frecuencias de la señal y los segundos, las bajas. En el caso de las imágenes nos referimos a frecuencias espaciales. De una forma, las altas frecuencias se asocian a cambios bruscos de intensidad en pequeños intervalos espaciales, es decir, bordes, mientras que las bajas frecuencias se refieren a cambios lentos en la intensidad.

#### 1.9.6.1 Filtros Paso Bajo

En la siguiente figura se muestran algunos núcleos de convolución que caracterizan los filtros paso bajo:

$$PB_1 \equiv \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad PB_2 \equiv \frac{1}{10} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad PB_3 \equiv \frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

Figura 1-36 TRES NÚCLEOS REPRESENTATIVOS DE FILTROS PASO BAJO

### 1.9.6.2 Filtros Paso Alto

En la siguiente figura se muestran algunos núcleos de Convolución que caracterizan los filtros paso alto:

$$PA_1 \equiv \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 5 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad PA_2 \equiv \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 9 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

$$PA_3 \equiv \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \\ -2 & 5 & -2 \\ 1 & -2 & 1 \end{bmatrix}$$

Figura 1-

FILTROS

$$\text{histograma}[i] = \frac{N_{\text{pixeles de nivel } i}}{N_{\text{total}}} \quad 0 \leq i \leq 255$$

37 TRES NÚCLEOS  
REPRESENTATIVOS DE  
PASO ALTO

### 1.9.7 HISTOGRAMA

El histograma de una imagen es la representación gráfica o analítica de la distribución relativa de cada valor posible de pixel de imagen, y en caso de imágenes grises de 8 bits será un vector de 256 componentes, siendo la componente  $i$  el número de pixeles de nivel  $i$  en la imagen, dividido por el número total de pixeles:

El histograma es formalmente la función estadística de densidad de probabilidad en forma discreta de los distintos niveles de gris dentro de la imagen.

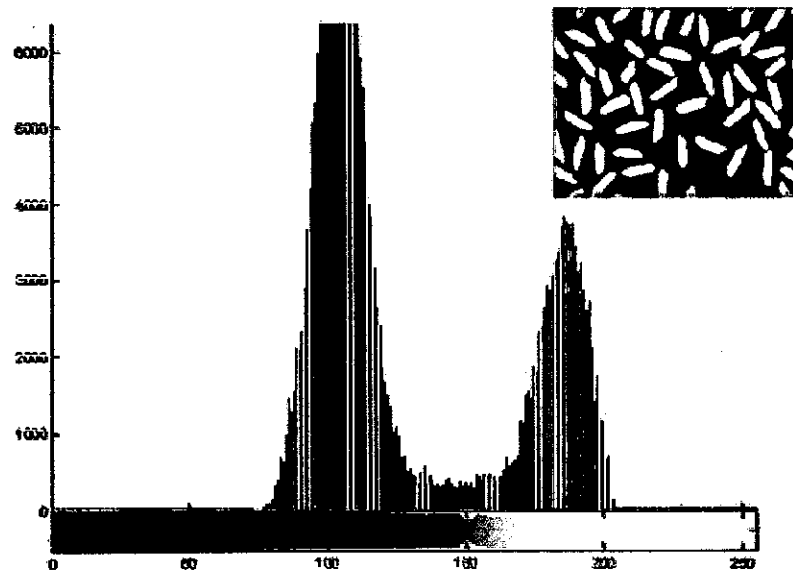


Figura 1-38 HISTOGRAMA

## 1.10 INTELIGENCIA ARTIFICIAL<sup>4</sup>

A pesar de que la mayoría de los intentos para definir términos complejos y a la vez ampliamente usados suelen ser inútiles, es positivo al menos esbozar los límites aproximados en los que encuadrar el concepto de la IA para poder proporcionar una perspectiva a la explicación que sigue a continuación. Para lograrlo, se ha propuesto la siguiente definición, a pesar de no ser aceptada universalmente. La Inteligencia Artificial (IA) estudia cómo lograr que las máquinas realicen tareas que, por el momento, son realizadas mejor por los seres humanos.

Esta definición es, por supuesto, bastante efímera ya que hace referencia al estado actual de la informática.

## 1.11 VISION ARTIFICIAL

También conocida como visión por computador (del inglés *computervision*) o visión técnica, es un subcampo de la inteligencia artificial y es el campo de acción más ambicioso

---

<sup>4</sup>Elaine Rich, Kevin Knight, "Inteligencia Artificial"

del procesamiento digital de imágenes. Básicamente el objetivo es automatizar funciones de inspección visual, tradicionalmente utilizadas por el hombre como por ejemplo.

Los objetivos típicos de la visión artificial incluyen:

- La detección, segmentación, localización y reconocimiento de ciertos objetos en imágenes (por ejemplo, caras humanas).
- La evaluación de los resultados (ej.: segmentación, registro).
- Registro de diferentes imágenes de una misma escena u objeto, hacer concordar un mismo objeto en diversas imágenes.
- Seguimiento de un objeto en una secuencia de imágenes.
- Mapeo de una escena para generar un modelo tridimensional de la escena; tal modelo podría ser usado por un robot para navegar por la escena.
- Estimación de las posturas tridimensionales de humanos.
- Búsqueda de imágenes digitales por su contenido.

## 1.12 ESPACIOS DE COLORES Y COLORIMETRÍA

Como ya se mencionó en una sección anterior, es posible representar los colores en base a una composición de colores fundamentales, imitando lo que hace nuestro ojo. En base a este hecho, es que se han creado espacios de colores que de alguna manera u otra, permiten representar un conjunto de valores. Normalmente no se pueden representar todos los colores que son realmente visibles, sin embargo, son lo suficiente como para representar la gran mayoría de colores que vemos regularmente.

Un espacio de color define un modelo de composición del color. Por lo general un espacio de color lo define una base de  $N$  vectores (por ejemplo, el espacio RGB lo forman 3 vectores: Rojo, Verde y Azul), cuya combinación lineal genera todo el espacio de color. Los espacios de color más generales intentan englobar la mayor cantidad posible de los colores visibles por el ojo humano, aunque existen espacios de color que intentan aislar tan solo un subconjunto de ellos.

Existen espacios de color de:

Una dimensión: escala de grises, escala Jet, etc.

Dos dimensiones: sub-espacio rg, sub-espacio xy, etc.

Tres dimensiones: espacio RGB, HSV, YCbCr, YUV, Y'I'Q', etc.

*Cuatro dimensiones: espacio CMYK.*

De los cuales, los espacios de color de tres dimensiones son los más extendidos y los más utilizados para la mayoría de las aplicaciones. En el caso que se cuente con un espacio de una dimensión de profundidad, estaríamos en presencia de un espacio de color que en la práctica puede representar el grado de luminosidad de la imagen; es básicamente una imagen en escala de grises, y no entrega información de color. Pero si queremos trabajar con colores, los modelos existentes especifican tres coordenadas, o atributos, que representan su posición dentro de un espacio de color específico. Estas coordenadas no nos dicen cuál es el color, sino que muestran dónde se encuentra un color dentro de un espacio de color en particular. A continuación se hará una descripción de los espacios de color más relevantes, así como los más importantes para este trabajo.

### **1.12.1 Espacio de color RGB**

Este modelo es el más utilizado para visualizar imágenes digitales en una pantalla en los formatos actuales. Como se ha dicho anteriormente, es un modelo aditivo, en el que sumando distintas cantidades de colores primarios podemos conseguir otros colores. En los archivos gráficos que utilizan este modelo utilizamos para representar una tripleta (R,G,B). Contienen tres planos de imágenes independientes, uno por cada color primario. Cuando estos planos se inyectan a un monitor que utiliza este sistema, la pantalla de fósforo reproduce una imagen a color. Es un sistema aditivo que variando la cantidad de color rojo, verde y azul agregados al negro, se produce nuevos colores. En los archivos gráficos el sistema RGB se usa para representar cada píxel con una tripleta o terna de la forma (R,G,B), quedando representado en un sistema cartesiano, como se puede apreciar en la figura.

En este sistema los colores vienen definidos por un punto del cubo, así los vértices comunes son los colores secundarios, el origen de coordenadas es el negro, y el punto donde se sumarian los 3 colores primarios será el vértice del color blanco. Y si trazamos una línea que una el negro con el blanco representará toda la escala de grises.

A un píxel se le asigna un valor entre 0(negro) y 255( blanco). La idea es la siguiente: si por ejemplo queremos un color rojo tendríamos que darle un valor alto a la coordenada del rojo y valores más pequeños a las otras dos coordenadas. Si todas las coordenadas son 255 tendremos un blanco puro e igualmente si todas son 0 tendremos un negro. Y si las 3 son iguales entonces tendremos un gris.



Las imágenes que utilizan este modelo, pueden reproducir en la pantalla hasta 16.7 millones de colores, ya que tendremos 3 canales (que presentan a cada uno de los planos) y 8 bits para presentar 255 valores, es decir tendremos 3x8 bits de información de color para cada píxel.

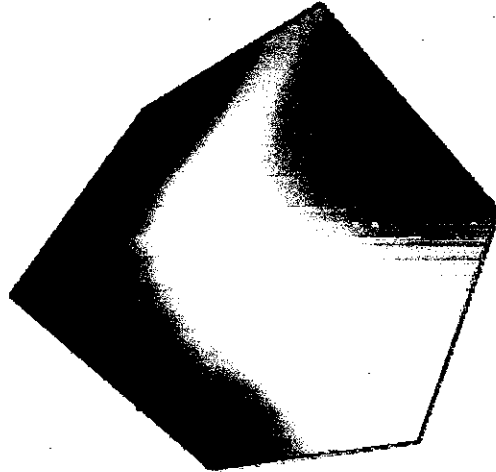


Figura 1-39 MODELO ADITIVO RGB

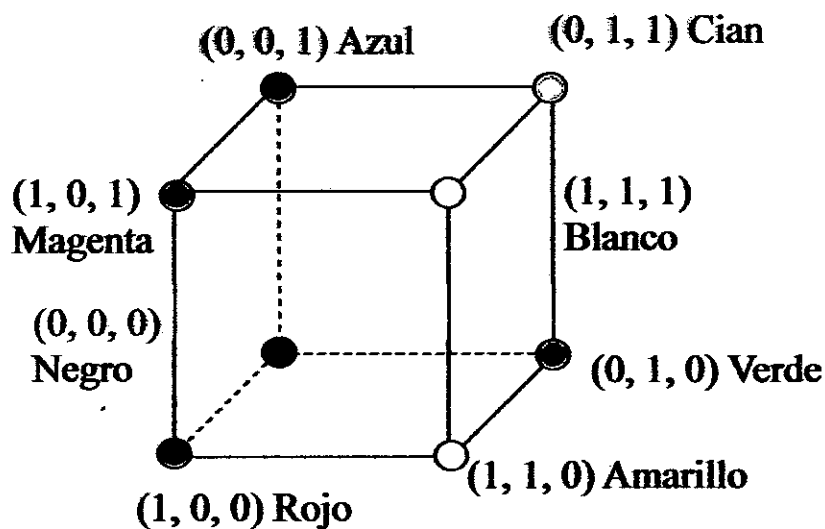


Figura 1-40 PESO DE LAS 3 COMPONENTES EN EL MODELO RGB

### 1.12.2 Espacio de color HSV

El modelo HSV (del inglés Hue, Saturation, Value) (Tonalidad, Saturación, Valor), también llamado HSB (Hue, Saturation, Brightness) (Tonalidad, Saturación, Brillo), define un modelo de color en términos de sus componentes constituyentes en coordenadas cilíndricas:

**Tonalidad**, el tipo de color (como rojo, azul o amarillo). Se representa como un grado de ángulo cuyos valores posibles van de 0 a 360° (aunque para algunas aplicaciones se normalizan del 0 al 100 %). Cada valor corresponde a un color. Ejemplos: 0 es rojo, 60 es amarillo y 120 es verde.

**Saturación**. Se representa como la distancia al eje de brillo negro-blanco.

Los valores posibles van del 0 al 100 %. A este parámetro también se le suele llamar "pureza" por la analogía con la pureza de excitación y la pureza colorimétrica de la colorimetría. Cuanto menor sea la saturación de un color, mayor tonalidad grisácea habrá y más decolorado estará. Por eso es útil definir la insaturación como la inversa cualitativa de la saturación.

**Valor del color**, el brillo del color. Representa la altura en el eje blanconeuro.

Los valores posibles van del 0 al 100 %. 0 siempre es negro. Dependiendo de la saturación, 100 podría ser blanco o un color más o menos saturado.

La figura muestra una representación del espacio HSV.

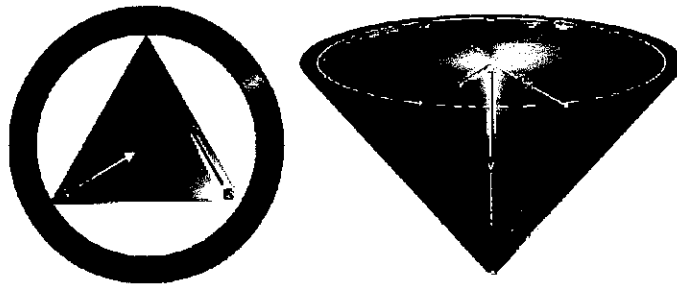


Figura 1-41 MODELO HSV

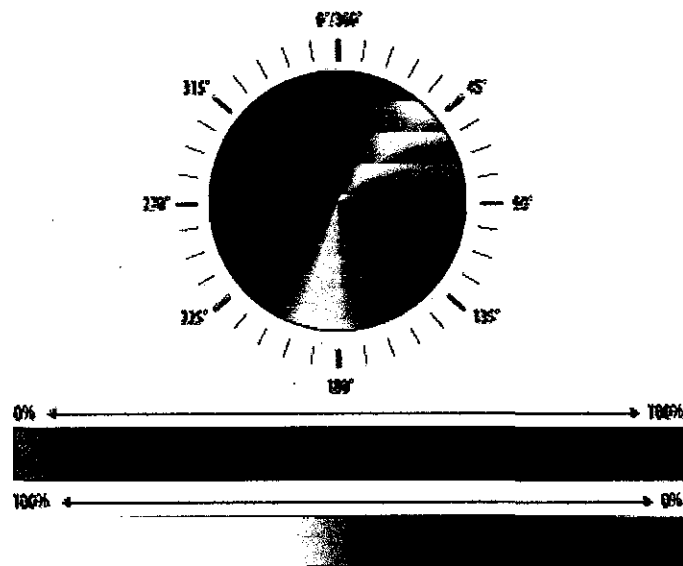


Figura 1-42 TINTE, SATURACIÓN Y VALOR

### 1.13 ARDUINO

Arduino<sup>5</sup> es una plataforma de hardware libre, basada en una placa con un microcontrolador y un entorno de desarrollo, diseñada para facilitar el uso de la electrónica en proyectos multidisciplinarios.

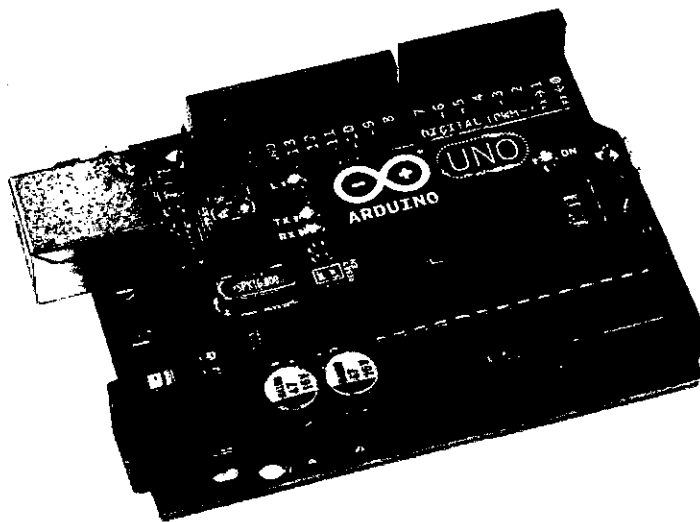


Figura 1-43 ARDUINO UNO

<sup>5</sup> <http://es.wikipedia.org/wiki/Arduino>

El hardware consiste en una placa con un microcontrolador Atmel AVR y puertos de entrada/salida. Los microcontroladores más usados son el Atmega168, Atmega328, Atmega1280, ATmega8 por su sencillez y bajo coste que permiten el desarrollo de múltiples diseños. Por otro lado el software consiste en un entorno de desarrollo que implementa el lenguaje de programación Processing/Wiring y el cargador de arranque que es ejecutado en la placa.

Desde octubre de 2012, Arduino se usa también con microcontroladores CortexM3 de ARM de 32 bits, que coexistirán con las más limitadas, pero también económicas AVR de 8 bits. ARM y AVR no son plataformas compatibles a nivel binario, pero se pueden programar con el mismo IDE de Arduino y hacerse programas que compilen sin cambios en las dos plataformas. Eso sí, los microcontroladores CortexM3 usan 3,3V, a diferencia de la mayoría de las placas con AVR que generalmente usan 5V. Sin embargo ya anteriormente se lanzaron placas Arduino con Atmel AVR a 3,3V como la Arduino Fio y existen compatibles de Arduino Nano y Pro como Meduino en que se puede conmutar el voltaje.

Arduino se puede utilizar para desarrollar objetos interactivos autónomos o puede ser conectado a software tal como Adobe Flash, Processing, Max/MSP, Pure Data). Las placas se pueden montar a mano o adquirirse. El entorno de desarrollo integrado libre se puede descargar gratuitamente.

Arduino puede tomar información del entorno a través de sus entradas analógicas y digitales, puede controlar luces, motores y otros actuadores. El microcontrolador en la placa Arduino se programa mediante el lenguaje de programación Arduino (basado en Wiring) y el entorno de desarrollo Arduino (basado en Processing). Los proyectos hechos con Arduino pueden ejecutarse sin necesidad de conectar a un computador.

El proyecto Arduino recibió una mención honorífica en la categoría de Comunidades Digital en el PrixArs Electrónica de 2006.

### 1.13.1 HISTORIA

Arduino se inició en el año 2005 como un proyecto para estudiantes en el Instituto IVREA, en Ivrea (Italia). En ese tiempo, los estudiantes usaban el microcontrolador BASIC Stamp, cuyo coste era de 100 dólares estadounidenses, lo que se consideraba demasiado costoso para ellos. Por aquella época, uno de los fundadores de Arduino, MassimoBanzi, daba clases en Ivrea.

El nombre del proyecto viene del nombre del Bar di Re Arduino (Bar del Rey Arduino) donde Massimo Banzi pasaba algunas horas. En su creación, contribuyó el estudiante colombiano Hernando Barragán, quien desarrolló la tarjeta electrónica Wiring, el lenguaje de programación y la plataforma de desarrollo. Una vez concluida dicha plataforma, los investigadores trabajaron para hacerlo más ligero, más económico y disponible para la comunidad de código abierto (hardware y código abierto). El instituto finalmente cerró sus puertas, así que los investigadores, entre ellos el español David Cuartielles, promovieron la idea. Banzi afirmaría años más tarde, que el proyecto nunca surgió como una idea de negocio, sino como una necesidad de subsistir ante el inminente cierre del Instituto de diseño Interactivo IVREA. Es decir, que al crear un producto de hardware abierto, éste no podría ser embargado.

Posteriormente, Google colaboró en el desarrollo del Kit Android ADK (Accessory Development Kit), una placa Arduino capaz de comunicarse directamente con teléfonos móviles inteligentes bajo el sistema operativo Android para que el teléfono controle luces, motores y sensores conectados de Arduino.

Para la producción en serie de la primera versión se tomó en cuenta que el coste no fuera mayor de 30 euros, que fuera ensamblado en una placa de color azul, debía ser Plug and Play y que trabajara con todas las plataformas informáticas tales como MacOSX, Windows y GNU/Linux. Las primeras 300 unidades se las dieron a los alumnos del Instituto IVRAE, con el fin de que las probaran y empezaran a diseñar sus primeros prototipos.

En el año 2005, se incorporó al equipo el profesor Tom Igoe, que había trabajado en computación física, después de que se enterara del mismo a través de Internet. Él ofreció su apoyo para desarrollar el proyecto a gran escala y hacer los contactos para distribuir las tarjetas en territorio estadounidense. En la feria MakerFair de 2011 se presentó la primera placa Arduino 32 bit para trabajar tareas más pesadas.

### **1.13.2 APLICACIONES**

El módulo Arduino ha sido usado como base en diversas aplicaciones electrónicas:

- Xoscillo: Osciloscopio de código abierto.
- Equipo científico para investigaciones.
- Arduinome: Un dispositivo controlador MIDI.

- **OBduino:** un económetro que usa una interfaz de diagnóstico a bordo que se halla en los automóviles modernos.
- **Humane Reader:** dispositivo electrónico de bajo coste con salida de señal de TV que puede manejar una biblioteca de 5000 títulos en una tarjeta microSD.
- **The Humane PC:** equipo que usa un módulo Arduino para emular un computador personal, con un monitor de televisión y un teclado para computadora.
- **Ardupilot:** software y hardware de aeronaves no tripuladas.
- **ArduinoPhone:** un teléfono móvil construido sobre un módulo Arduino.

### 1.13.3 ESQUEMA DE CONEXIONES

#### 1.13.3.1 ENTRADAS Y SALIDAS

Poniendo de ejemplo al módulo Diecimila, éste consta de 14 entradas digitales configurables como entradas y/o salidas que operan a 5 voltios. Cada contacto puede proporcionar o recibir como máximo 40 mA. Los contactos 3, 5, 6, 8, 10 y 11 pueden proporcionar una salida PWM (Pulse Width Modulation). Si se conecta cualquier cosa a los contactos 0 y 1, eso interferirá con la comunicación USB. Diecimila también tiene 6 entradas analógicas que proporcionan una resolución de 10 bits. Por defecto, aceptan de 0 hasta 5 voltios, aunque es posible cambiar el nivel más alto, utilizando el contacto Aref y algún código de bajo nivel.

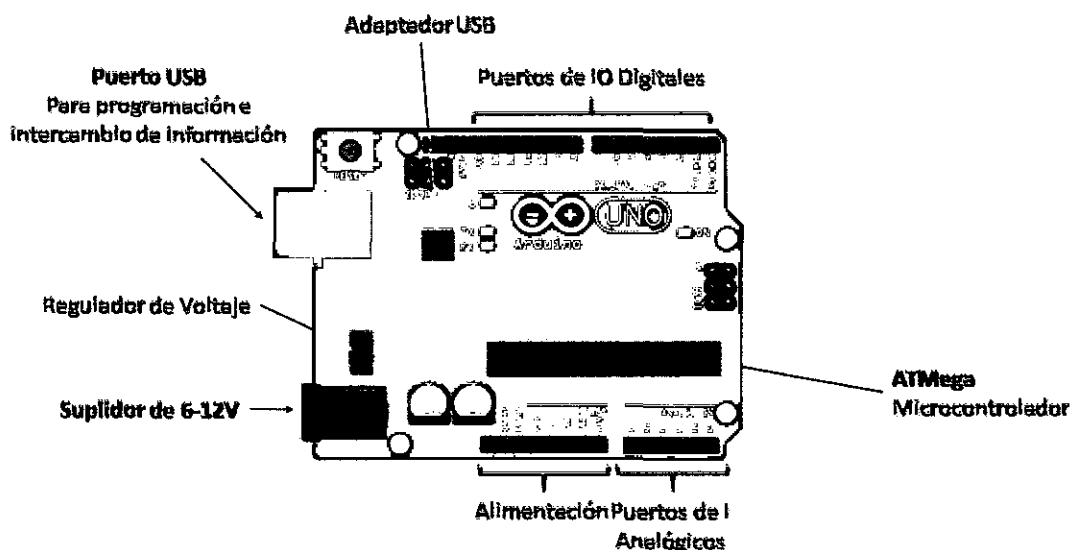


Figura 1-44 PARTES DEL ARDUINO UNO

A continuación se muestra la disposición de los pines de Arduino Uno:

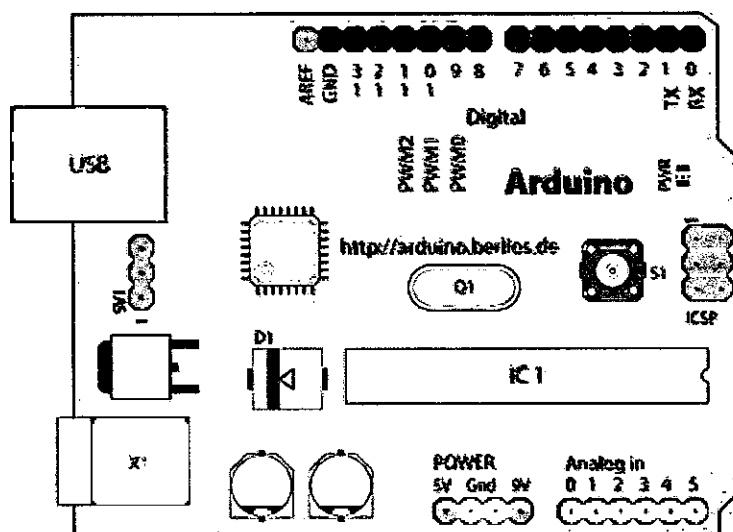


Figura 1-45 PINES DEL ARDUINO UNO

Los modelos Arduino Uno, Arduino Duemilanove y Arduino Mega están basados en los microcontroladores ATmega168, ATmega328 y ATmega1280.

	ATmega168	ATmega328	ATmega1280
Voltaje operativo	5 V	5 V	5 V
Voltaje de entrada recomendado	7-12 V	7-12 V	7-12 V
Voltaje de entrada límite	6-20 V	6-20 V	6-20 V
Contactos de entrada y salida digital	14 (6 proporcionan PWM)	14 (6 proporcionan PWM)	54 (14 proporcionan PWM)

Contactos de entrada analógica	6	6	16
Intensidad de corriente	40 mA	40 mA	40 mA
Memoria Flash	16KB (2KB reservados para el bootloader)	32KB (2KB reservados para el bootloader)	128KB (4KB reservados para el bootloader)
SRAM	1 KB	2 KB	8 KB
EEPROM	512 bytes	1 KB	4 KB
Frecuencia de reloj	16 MHz	16 MHz	16 MHz

*Tabla 1-6 MICROCONTROLADORES ATMEGA168, ATMEGA328 Y ATMEGA1280*

#### 1.13.4 LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN DE ARDUINO

La plataforma Arduino se programa mediante el uso de un lenguaje propio basado en el lenguaje de programación de alto nivel Processing. Sin embargo, es posible utilizar otros lenguajes de programación y aplicaciones populares en Arduino, debido a que Arduino usa la transmisión serial de datos soportada por la mayoría de los lenguajes mencionados. Para los que no soportan el formato serie de forma nativa, es posible utilizar software intermediario que traduzca los mensajes enviados por ambas partes para permitir una comunicación fluida.



# **CAPITULO II:**

# **MATERIAL Y**

# **MÉTODOS**

## 2 MATERIAL Y MÉTODOS

### 2.1 MATERIALES

- Laptop de 2 GHz, 1GB RAM, 350GB DD.
- Una cámara webcam para capturar video.
- Microcontrolador - Arduino Uno
- Componentes electrónicos
- Un soporte para el sistema de captura.
- Maqueta para el sistema

### 2.2 METODOLOGÍA

El objetivo del sistema es estabilizar usando un lazo de realimentación para controlar la posición de la esfera sobre la barra. Se utiliza un sensado por medio de una cámara web y un algoritmo de detección de colores.

El sistema esfera sólida sobre la barra está compuesto por:

- Una barra a la que se le puede cambiar su ángulo de elevación.
- Un servomotor con reductor y engranajes que permiten cambiar el ángulo de elevación de la barra.
- Una esfera sólida de color rojo que se mueve libremente sobre la barra.
- Un sensor que permite conocer la posición de la esfera sobre la barra.

Entonces lo que hay que buscar es estabilizar la posición de la esfera en cualquier punto sobre la barra.

Para lograr este objetivo, el plan es seguir los pasos del siguiente diagrama, una vez armada la planta, que consiste en inicializar los servomotores, para posteriormente entrar en un bucle. Dentro de este bucle, leemos la posición del eje X, que nos entrega por puerto serial el software Matlab a través de la Pc, donde corre un programa, de captura y procesamiento de imágenes.

El controlador PID, se encuentra implementado en la tarjeta Arduino Uno y es ésta, que a través de la señal PWM, se controla la acción del Servomotor.

No se requiere fuente de alimentación externa, ya que tanto la cámara webcam y la tarjeta Arduino Uno utilizan el puerto USB de la Pc. Además el servo utiliza como alimentación a través de un pin de la tarjeta Arduino Uno.

Para la implementación del algoritmo que gobierna el proceso, se ha seguido en función del siguiente diagrama de Flujo :

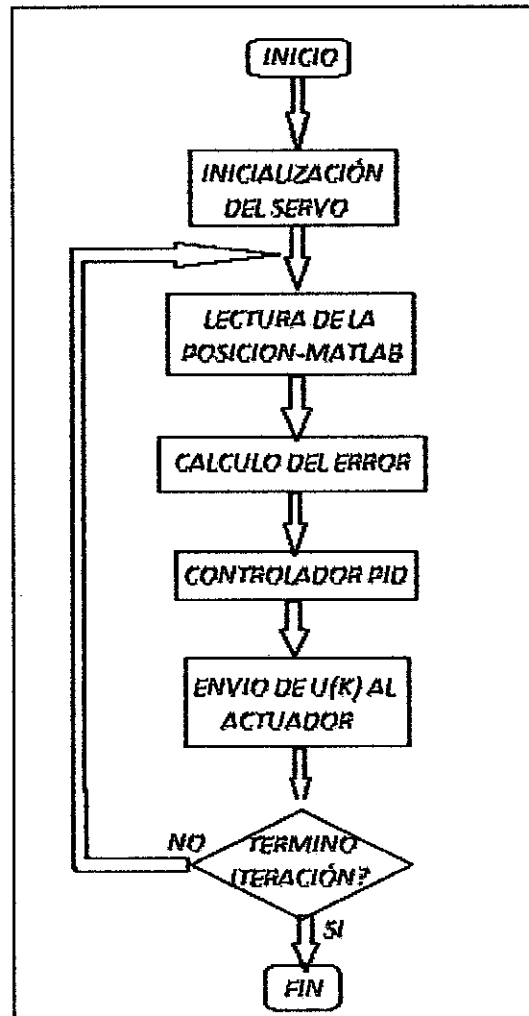


Figura 2.1 DIAGRAMA DEL SISTEMA

Como se puede apreciar en la Figura 2.1, la programación es secuencial, teniendo como punto inicial el posicionamiento del servo motor, el cual debe adoptar una posición al momento de la ejecución del programa, dicha posición es leída y enviada al computador para ser ingresada en el software, que en éste caso es el MATLAB, el cual se ha elegido por su alta confiabilidad en el procesamiento de datos. Posteriormente se toma la medida

del error, es decir, se obtiene la diferencia entre el Set Point del proceso y la posición actual del servo motor, luego se ejecuta la estrategia de control programada, se ha implementado un controlador digital PID, el cual mediante su ecuación nos brinda una respuesta, tal respuesta  $U(K)$  es enviada al actuador para ejecutar el movimiento correspondiente y de ésta manera mantener el equilibrio del sistema.

Finalmente el algoritmo escanea la salida para comparar nuevamente con la condición inicial y en caso existiera diferencia nuevamente ejecuta la tarea de control, éste proceso es cíclico y está en constante evaluación de las variables

### 2.2.1 CONSTRUCCIÓN DE LA PLANTA

Como se puede observar en la figura, la construcción de la planta se ha hecho teniendo en cuenta las dimensiones de la barra. Es decir como la barra tiene una longitud de 50.5cm. La altura de la cámara con respecto a ésta es de 58 cm, distancia necesaria para que la webcam pueda capturar la escena, es decir, toda la barra de aluminio, donde se va a desplazar la esfera.

La barra como se dijo, es de aluminio, un extremo se fija, a través de una articulación, con otro aluminio fijo a la plataforma y en el otro extremo está la articulación con el servomotor.

Para la sensórica se ha implementado un procesamiento digital de imágenes, que mediante una cámara web va a captar el posicionamiento y devolver un dato que será ingresado al controlador PID, la cámara webcam está acoplada a un soporte fijo de una altura de 73cm, como podemos apreciar en la siguiente figura :

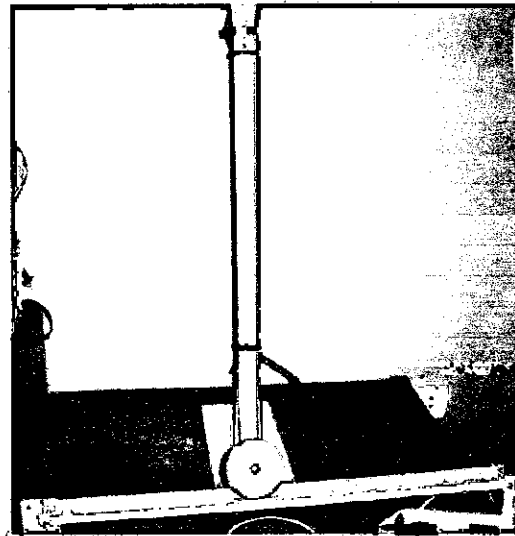


Figura 2.2 SISTEMA BARRA ESFERA

En la Figura 2.2 podemos apreciar el sistema en equilibrio y se puede visualizar la barra sobre la cual está posicionada la esfera que va a ser estabilizada mediante el servo motor.

La masa de la esfera es de 50gr. Tiene un diámetro de 6cm. Y para segmentarla se ha escogido el color rojo, que en realidad puede tener cualquier otro color. Los algoritmos se prepararán para este color. La longitud de la barra es de 50.5 cm. Y la medida del brazo de palanca es de 11cm. Estas medidas se tomaron en base al material que se tuvo. Por supuesto, que se consideran en el modelo matemático, como se detalla, en la parte de control, mas adelante.

El programa desarrollado para este proyecto está dividido en dos partes, una de adquisición y una de control.

## 2.2.2 ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

El programa de adquisición y procesamiento digital de imágenes está desarrollado en el software Matlab, que se ejecuta en una Pc. El algoritmo, tiene que ser en lo posible, el

## 2.2.5 MODELO MATEMÁTICO DE LA PLANTA

La relación entre la entrada (ángulo theta) con la salida (posición de la esfera sólida) viene dada por:

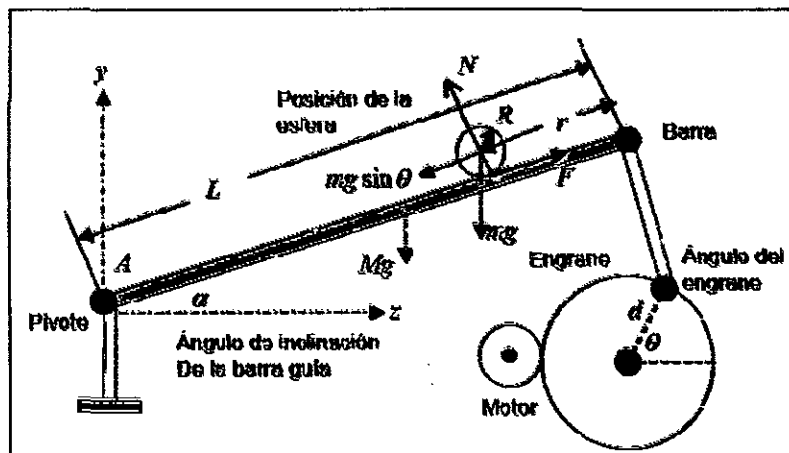


Figura 2.6 SISTEMA A CONTROLAR

El sistema barra-esfera de la figura, se encarga de ubicar una esfera que se desplaza sobre una barra en una nueva posición, la posición de la esfera es controlada al variar el ángulo  $\alpha$  de la barra, que está relacionada de manera directa con el ángulo  $\theta$  del engrane del motor, de esta manera la esfera puede ser posicionada en algún lugar deseado de la barra balanceándola de manera adecuada.

$$\frac{R(s)}{\Theta(s)} = -\frac{mgd}{L\left(\frac{J}{R^2} + m\right)} \frac{1}{s^2}$$

Ecuación 16

Teniendo en cuenta los parámetros del sistema, sus valores reales son los siguientes:

Masa de la esfera	$m = 0.05 \text{ Kg}$
Radio de la esfera	$R = 0.03 \text{ m}$
Aceleración gravitacional	$g = -9.8 \text{ m/s}^2$
Longitud de la barra	$L = 0.505 \text{ m}$
Offset del brazo de palanca	$d = 0.11 \text{ m}$
Momento de inercia de la esfera	$J = 9.99\text{e-}6 \text{ Kg.m}^2$

Si reemplazamos en la ecuación, obtenemos:

$$\frac{1.7469}{s^2}$$

Ecuación 17

Teniendo en cuenta un periodo de muestreo  $T_s=0.1$ , la función de transferencia discreta queda como:

$$\frac{0.0087343z + 0.0087343}{z^2 - z + 1}$$

Ecuación 18

El controlador a utilizar es el PID, cuya función es la siguiente:

$$K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s}$$

Ecuación 19

Donde:

Kp: Constante proporcional

Ki: Constante integral

Kd: Constante derivativa

Cuya función de transferencia discreta es:

$$\frac{(K_p + K_i + K_d)z^2 - (K_p + 2K_d)z + K_d}{z^2 - z}$$

Ecuación 20

Por lo tanto, con toda esta información, nos queda ver los resultados.

---

# **CAPITULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN**



### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con respecto a la parte del procesamiento digital de imágenes, y siguiendo la estructura del diagrama propuesto anteriormente, se presentan paso a paso los resultados. El código respectivo se encuentra en el Anexo N°1.

Se puede ver a continuación la adquisición de la imagen original (data), con su código respectivo. En la escena, aparecen numerosos y diferentes objetos, así como también diferentes fondos. La idea es que el algoritmo funcione, no solamente con un fondo blanco por ejemplo o con fondo solamente negro. El requisito, es que no aparezcan objetos de color rojo o que tengan de alguna manera, componente roja.

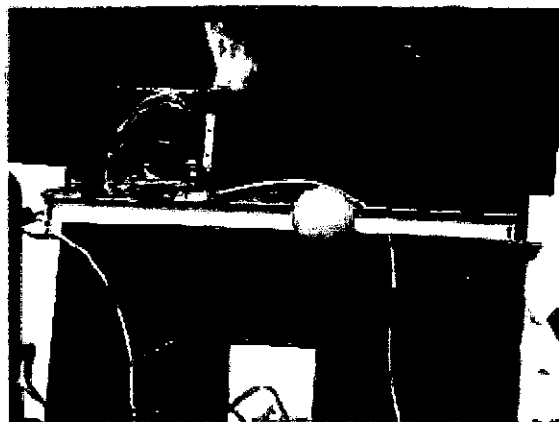
```
data = getsnapshot(vid)
```



*Figura 3.1 IMAGEN ORIGINAL*

Para poder extraer la componente roja, de la imagen de color, pues extraemos ésta componente, como se aprecia en la figura y con el siguiente código.

```
data(:,:,1)
```



*Figura 3.2 COMPONENTE ROJA DE LA IMAGEN COLOR*

---

Además se necesita la imagen de escala de grises, que no es más que el promedio de las 3 componentes, es decir, de la componente roja, componente verde y componente azul. Cabe resaltar que cada componente se representa con 8 bits, es decir cada componente tiene un valor entre el rango de 0 a 255.

`rgb2gray(data)`



*Figura 3.3 IMAGEN EN ESCALA DE GRISES*

Como resultado de restar las dos imágenes de las figuras anteriores, tenemos como resultado, la imagen de la figura siguiente, donde resalta la esfera sólida y todos los objetos restantes se han opacado.

`diff_im = imsubtract(data(:,:,1), rgb2gray(data))`



*Figura 3.4 SUSTRACCIÓN DE LAS 2 IMAGENES*

Para suavizar los pixeles de la imagen anterior, utilizamos un Filtro de mediana. Este filtro lo que hace es tomar 9 pixeles (3 filas por 3 columnas) y ordenarlos de mayor a menor. El pixel resultado, consiste en extraer el valor del pixel central es decir el 5to pixel. El resultado se aprecia en la figura.

```
diff_im = medfilt2(diff_im, [3 3])
```



Figura 3.5 IMAGEN DESPUES DE APLICAR FILTRO MEDIANA

Como ya hay prácticamente una diferencia entre el fondo y el objeto de interés, que es la esfera, se procede a hacer un análisis del histograma de la imagen anterior. Como se observa en la figura 3-6 hay una gran cantidad de pixeles cercanos al valor 0, pues, estos son pixeles de color cercano al negro (fondo de la imagen), así como también en menor proporción, pixeles mayores al valor 46, pertenecientes a la esfera. Entonces en base a este análisis se toma como referencia el valor del Umbral = 46 para binarizar la imagen.

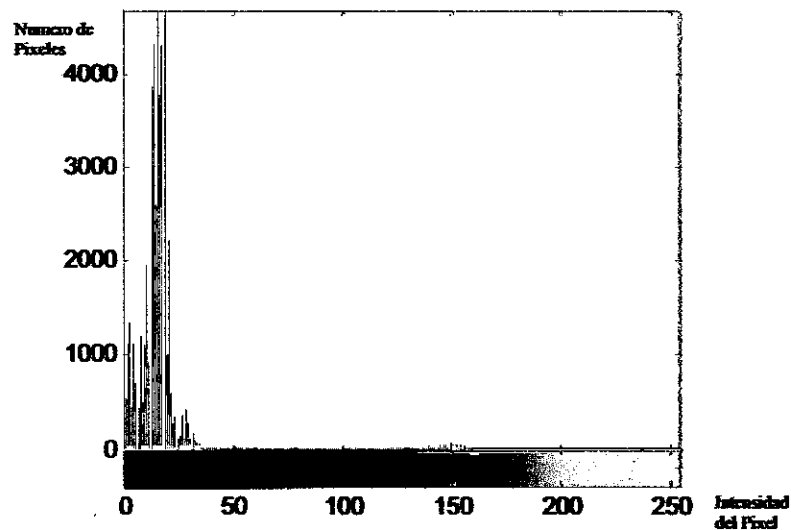
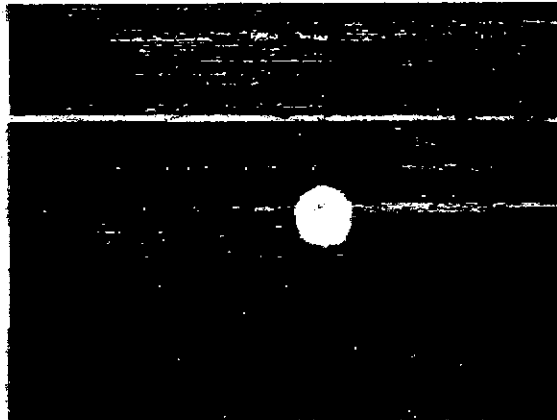


Figura 3.6 HISTOGRAMA DE LA IMAGEN

---

En la figura siguiente, se observa la binarización de la imagen, con su respectivo código.

```
diff_im = im2bw(diff_im,0.18)
```

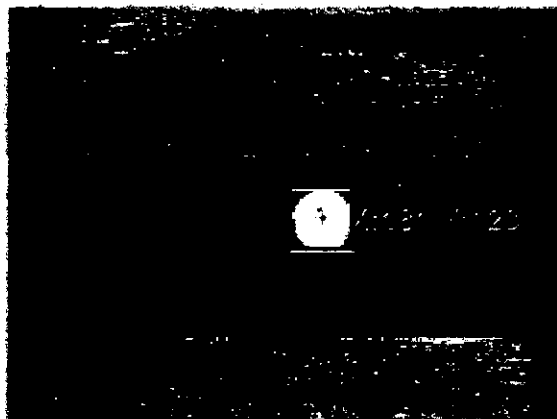


*Figura 3.7 IMAGEN BINARIZADA*

El número 0.18, es un número normalizado, viene de dividir 46/255, 46 es el umbral y 255 es el valor máximo de la intensidad del nivel de gris. Este valor queda aún en cambios de iluminación leve.

El último paso es obtener el centroide del objeto, que no es más que las coordenadas del centro de la imagen.

```
stats = regionprops(logical(bw), 'BoundingBox', 'Centroid');
```



*Figura 3.8 CENTROIDE DE LA IMAGEN RESULTANTE*

El Centroide es el punto central de un área. El centro de gravedad de una forma simple, como un cuadrado un triángulo o un círculo es fácil de detectar, y sencillo de calcular. Sin embargo, el punto central de una forma irregular no es tan obvio y el cálculo de su ubicación puede ser complicado. El método de cálculo del centroide consiste en tomar la distancia media en cada dirección.

Con respecto a la parte de control, el respectivo código se encuentra en el Anexo N°2, observamos la respuesta a una entrada escalón en lazo abierto, lo que demuestra que se trata de un sistema inestable.

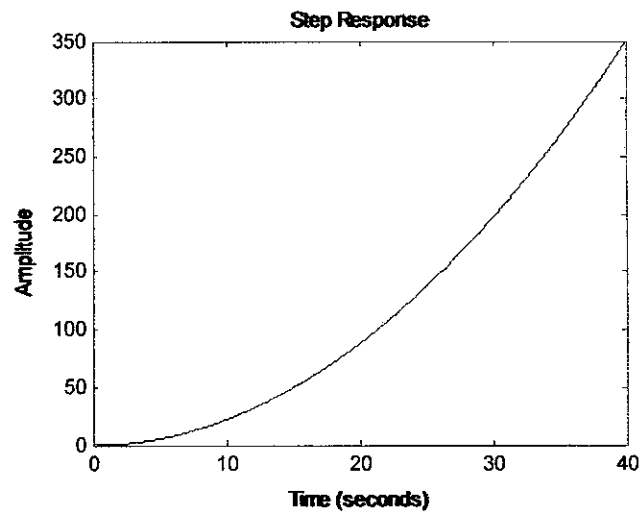


Figura 3.9 RESPUESTA AL ESCALÓN, SISTEMA EN LAZO ABIERTO

Utilizando un controlador P, con  $K_p=0.1$  tenemos la siguiente respuesta, el sistema comienza a oscilar, por lo tanto la esfera no se mantiene en una posición fija.

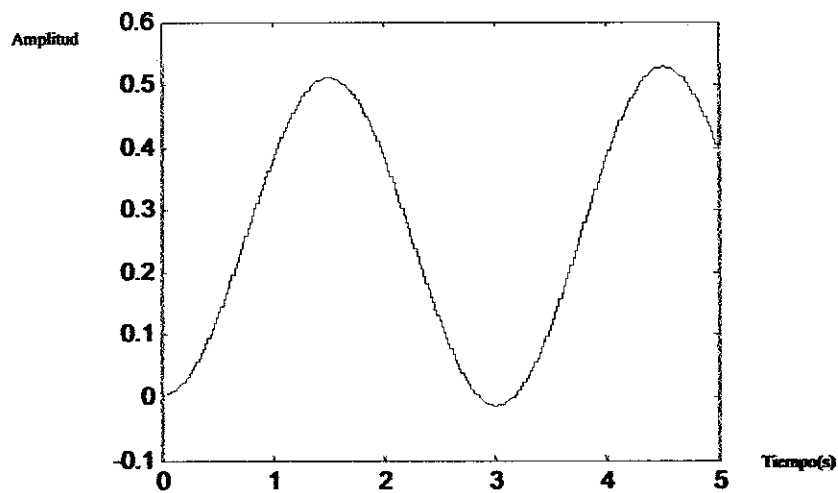


Figura 3.10 RESPUESTA A UN ESCALON, CONTROLADOR P

Utilizando un controlador P, con  $K_p=0.1$ ,  $K_i=0.2$ , tenemos la siguiente respuesta, se observa que la respuesta del sistema se vuelve inestable.

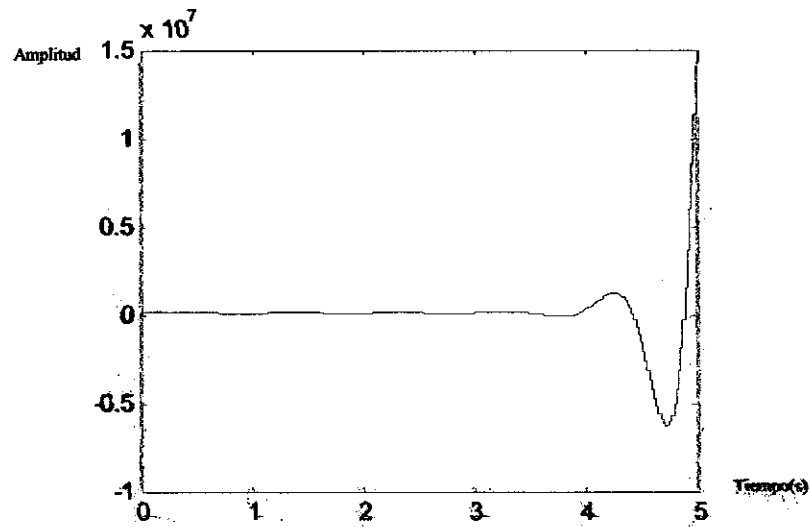


Figura 3.11 RESPUESTA A UN ESCALON, CONTROLADOR PI

Utilizando un controlador P, con  $K_p=0.1$ ,  $K_i=0.2$ ,  $K_d=15$ , tenemos la siguiente respuesta

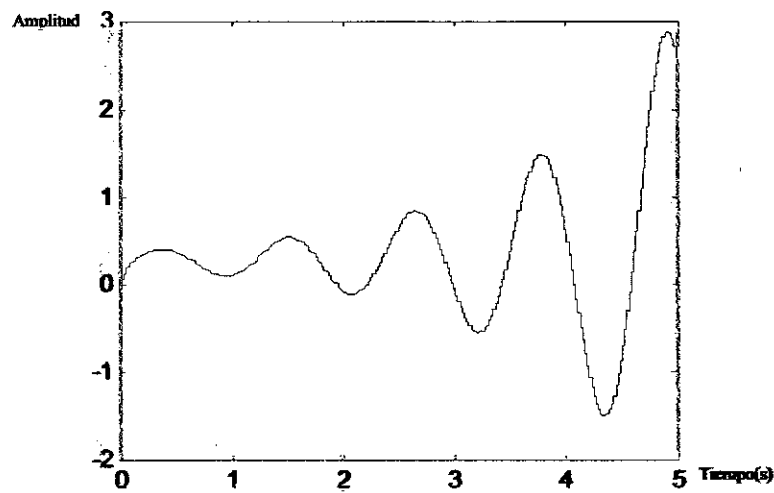


Figura 3.12 RESPUESTA A UN ESCALON, CONTROLADOR PID

Ahora utilizando un controlador PD, con  $K_p=0.1$  y  $K_d=15$ , obtenemos la siguiente respuesta

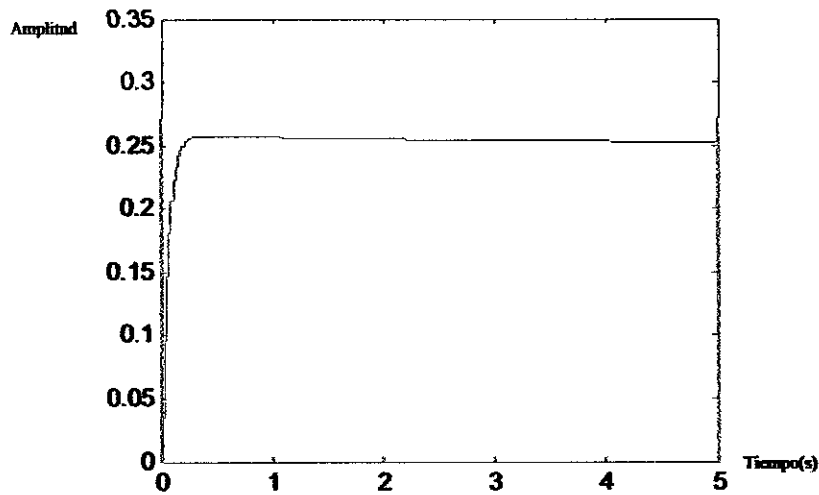


Figura 3.13 RESPUESTA A UN ESCALÓN, CONTROLADOR PD

Dependiendo de la posición deseada de la esfera, el sistema logra controlarse, o sea la salida sigue a la entrada.

Con respecto a los valores posicionales iniciales, se debe indicar que conforme se han realizados las pruebas experimentales, se determinó por asignar un valor inicial de posición equivalente a  $-40^\circ$  en sentido horario para poder iniciar el proceso con un error inducido, de tal manera que el sistema de posicionamiento comienza a realizar las comparaciones correspondientes que se llevan a cabo en el controlador para poder corregir dicho error y estabilizar la esfera.

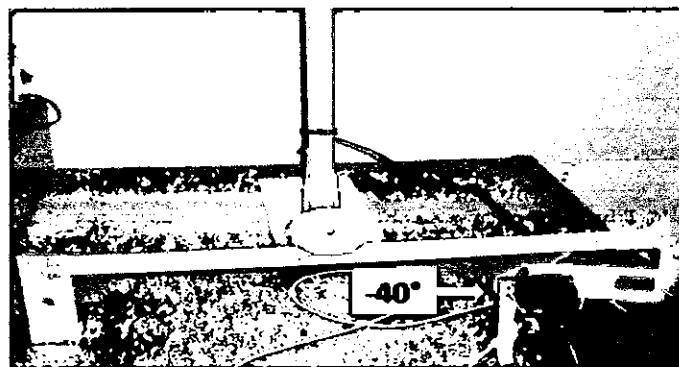


Figura 3.14 POSICIÓN INICIAL DEL SISTEMA

En cuanto a la calibración manual del campo visible de la cámara Web, también se han tenido en cuenta valores posicionales en el eje x que corresponde al desplazamiento para tener un encuadre digital que permita mayor precisión al momento de ejecutar el proceso, por ejemplo según datos experimentales se ha tomado como referencia desde los 15 hasta los 260 píxeles aproximadamente de la imagen binarizada y discretizada.

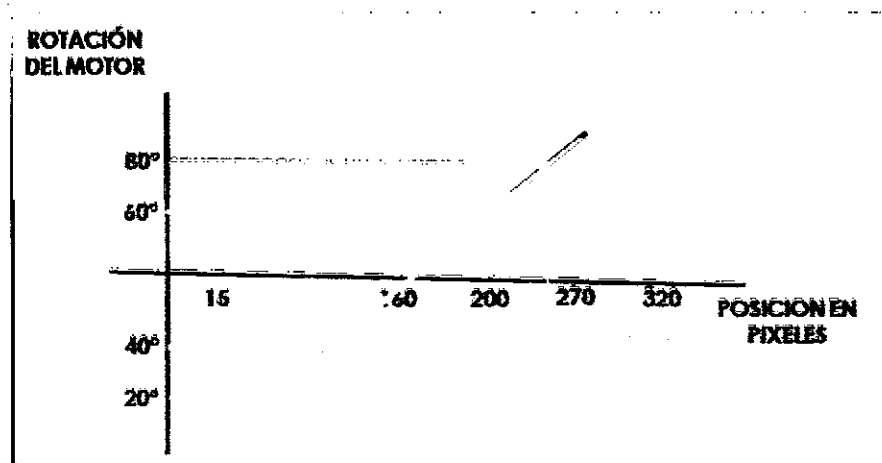


Figura 3.15 DIAGRAMA REPRESENTATIVO DE GRADOS DE ROTACIÓN VERSUS POSICION EN PÍXELES

Según sugerencias del jurado evaluador de la presente tesis, se ha considerado indicar detalles acerca del software empleado para el desarrollo del referido proyecto, lo cual detallo a continuación:

- Para la captura de imágenes se ha utilizado una Web Cam muy convencional la cual incluye un driver o controlador digital que se ha instalado en el computador, cabe indicar que dicho driver es propietario, pero el costo está incluido en la compra de la cámara.
- Para el procesamiento digital de las imágenes se ha empleado el software Matlab, el cual es licenciado, pero para efectos de desarrollo del proyecto se obtuvo una licencia temporal gratuita, por lo que no fue necesario adquirirla.
- Finalmente, el controlador digital es un elemento Open Source, lo que implica que tanto el Arduino como su respectivo software son de uso libre y no contempla bajo ningún concepto el pagar por los derechos de utilización.



---

## CONCLUSIONES

Los reguladores PID, son algoritmos de control de gran preferencia por su sencillez, y se encuentran en la mayoría de controles en la industria actualmente.

A partir de las pruebas se encuentra que con el controlador PD se puede estabilizar a la planta y se obtiene un leve error en estado estacionario que es incompatible con el efecto integral de la planta y es debido al rozamiento. Se intentó corregir agregando un término integral pero la interacción de ambos efectos produce oscilaciones indeseadas. Por lo tanto, al implementar el lazo de control sobre el sistema se concluyó que el sistema es controlable.

También el procesamiento de la imagen es sencillo y funciona dentro de un ambiente con iluminación no controlada.

Los algoritmos de control discreto, se implementan digitalmente por medio de procesadores o sistemas de computación, con lo que se logra alcanzar flexibilidad sobre opciones adicionales a la estrategia de control básica utilizada.

Las potentes herramientas de Software y Hardware, en la actualidad nos ofrecen una gran ventaja en el diseño y análisis de sistemas de control, con lo que se facilita enormemente modelar, diseñar e implementar características necesarias, en un algoritmo de control.

El paquete de Software Matlab 2014a, con sus diferentes herramientas especializadas, como el Control Toolbox, es capaz de analizar y maximizar algoritmos de control, tal como controles PID en tiempo discreto y continuo, con relativa facilidad y rapidez.

El sistema "Ball and Beam" es una excelente herramienta para demostrar las ideas de control moderno, ya que su dinámica, aunque es simple, es muy cercana a la dinámica real encontrada en sistemas aero-espaciales.

Al implementar el lazo de control sobre el sistema se concluyó que el sistema es controlable.

La señal de los sensores de posición puede llegar a variar dependiendo del color, material o diámetro de la esfera.

---

## RECOMENDACIONES

Es de primordial importancia para ingenieros e investigadores el uso de tecnología y herramientas de software moderno, que les permita el análisis y procesamiento de información de forma rápida y concisa, para obtener de este modo, resultados eficaz y eficientemente.

Todos los sistemas de control en la actualidad son o están siendo reemplazados, por equivalentes digitales, por lo que la implementación y comparación entre los mismos tiene gran importancia para comprender y evaluar las diferentes ventajas que cada sistema nos ofrece.

Entre todas las recomendaciones que se pueden emitir en base a la presente investigación está el uso de tecnologías libres y abiertas que permitan ahorrar el tiempo en diseño e implementación de hardware para centrarse en la búsqueda de la solución a un problema real. El desarrollo de aplicaciones industriales o de enseñanza se hace más factibles cuando hacemos uso de Hardware y Software libre, ya que en su mayoría son modulares y permiten conectividad directa.

Además de documentar la información recopilada y obtenida en la presente tesis, también es recomendable compartirla en la internet ya sea mediante foros científicos ó redes sociales que faciliten su difusión y de ésta manera poder apreciar la optimización del sistema planteado ya que siempre habrá algún tesista o investigador que pueda considerar lo aportado como un avance sustancial y tome como referencia ésta investigación.

Finalmente lo principal es recomendar el cálculo electrónico correspondiente y correcto ya que el sistema va a depender directamente de la tensión de alimentación y la corriente respectiva, con uno de éstos dos parámetros fundamentales fallando o inestable, no se podría obtener precisión en la recopilación de datos de nuestros sensores, mucho menos en las respuestas que son enviadas a los actuadores.

---

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Elaine Rich, Kevin Knight, (1994) "Inteligencia Artificial", España, McGraw-Hill.  
The Mathworks, Inc. Homepage. [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com), 2014.
2. Gonzalo Pajares Martín Sanz, Jesús Mammel de la Cruz García, José Manuel molina pascual, Juan Cuadrado Pardo, Alejandro López Correa (2004) "Imágenes digitales - Procesamiento practico con java. España. Alfa Omega Grupo Editor S.A.
3. Rafael C. Gonzales, Richard E. Woods (1996), Tratamiento Digital de Imágenes. USA, Addison Wesley Iberoamericana.
4. Katsuhiko Ogata (1987) "Discrete-Time Control Systems". USA. Prentice Hall.
5. Valdez, Fernando y Pallas, Ramón, Microcontroladores: Fundamentos y aplicaciones con PIC, 3<sup>ra</sup> Edición, Editorial MARCOMBO S.A., Barcelona-España, 2007.
6. [www.arduino.cc](http://www.arduino.cc)

---

## ANEXO N° 1

### PROGRAMA DE MATLAB

```
%borrar puertos previos
delete(instrfind({'Port'}, {'COM4'}));

%crear objeto puerto serie
s = serial('COM4','BaudRate',9600,'Terminator','CR/LF');
warning('off','MATLAB:serial:fscanf:unsuccessfulRead');

%abrir puerto
fopen(s);
posX=0;

% se crea objeto para adquisición de imágenes
vid=videoinput('winvideo',3,'YUY2_320x240');

% Se configura las opciones de adquisicion de video
set(vid, 'FramesPerTrigger', Inf);
set(vid, 'ReturnedColorspace', 'rgb');
vid.FrameGrabInterval = 1;

%framegrabinterval significa que tomara cada 1 frame del stream de video adquirida
start(vid)%se activa la adquisicion

%despues de 1000 frames adquiridos se salga del bucle
while(vid.FramesAcquired<=1000)
    %capturamosimagen
    data = getsnapshot(vid);

    % tenemos que extraer el color rojo
    diff_im = imsubtract(data(:,:,3), rgb2gray(data));
    diff_im = medfilt2(diff_im, [3 3]);

    % Convertir la imagen en escala de grises a una imagen binaria.
    diff_im = im2bw(diff_im,0.18);

    %imagen de rojo de menos de 10 pixels se eliminan
    diff_im = bwareaopen(diff_im,10);

    % Etiquetamos los elementos conectados en la imagen
    bw = bwlabel(diff_im);

    stats = regionprops(logical(bw), 'BoundingBox', 'Centroid');
```

---

```

imshow(diff_im,'InitialMagnification','fit')

%encerramos el objeto rojo en un rectangulo y una cruz en el centroide
for object = 1:length(stats)
    bb = stats(object).BoundingBox;
    bc = round(stats(object).Centroid);
    posX=bc(1)%320-bc(1)
    rectangle('Position',bb,'EdgeColor','r','LineWidth',2)
    plot(bc(1),bc(2), '-m+')
        a=text(bc(1)+15,bc(2),    strcat('X:    ',    num2str(round(bc(1))),    '    Y:    ',
num2str(round(bc(2)))))
    set(a, 'FontName', 'Arial', 'FontWeight', 'bold', 'FontSize', 12, 'Color', 'yellow');
end
fwrite(s,posX); %85-->Horizontal %Entre 60-120
end
fclose(s);
delete(s);
stop(vid); % detenemos la captura
clearall

```

---

## ANEXO Nº 2

### PROGRAMA DEL ARDUINO

```
byteMLab = 0;
bytepinPWM = 10;
//Parametros PID
unsigned long lastTime;
doubleEntrada, Salida, Setpoint;
doubleerrSum, lastErr;
doublekp, ki, kd;
doublemin_out=60;
doublemax_out=120;
void setup()
{
    // inicializar puerto serie
    Serial.begin(9600);
    // preparar output
    pinMode(pinPWM, OUTPUT);
    delay(500);
    kp=0.05;
    ki=0;;
    kd=0;;
}

void loop()
{
    // leer del serie si hay datos
    if(Serial.available())
    {
        MLab = Serial.read();
    }
    // PID
    Setpoint=150.0; //90+30*cos(2*pi*0.5*t);
```

---

```

Entrada = (double)MLab;
/* Cuanto tiempo pasó desde el último cálculo. */
unsigned long now = millis();
/* Calculamos todas las variables de error. */
double error = Setpoint - Entrada;
errSum += error;
double dErr = (error - lastErr) / timeChange;
Salida = kp * error + ki * errSum + kd * dErr;
lastErr = error;
lastTime = now;
if (Salida > max_out)
{
    Salida = max_out;
}
if (Salida < min_out)
{
    Salida = min_out;
}
analogWrite(pinPWM, Salida);

```